Revue générale des Sciences

pures et appliquées

et Bulletin de l'Association Française pour l'Avancement des Sciences

TOME LXI Novembre-Décembre 1954 Nos 11-12

CHRONIQUE ET CORRESPONDANCE

L'EXPLOITATION ÉVENTUELLE ET LE PEUPLEMENT DU SAHARA

Dans une récente Chronique, j'ai parlé des ressources minières du Sahara. Je reviens aujourd'hui sur un point particulier : l'éventualité d'une mise en exploitation et les possibilités réelles du peuplement humain du Sahara.

On lit de temps à autre que le Sahara est riche de possibilités minières et que la prospection n'est qu'à ses débuts. La difficulté dont on ne parle pas est la rareté de l'eau, cette eau dont on a absolument besoin. Rien ne prouve qu'il existe suffisamment d'eau en profondeur pour qu'une exploitation soit conduite normalement dans la moitié Sud du Sahara : Tanezrouft, Ténéré et autres lieux de mauvaise réputation. Peut-être trouvera-t-on le moyen de provoquer artificiellement des chutes de pluie ?

La question qui se pose aujourd'hui est de savoir, si, dans les conditions actuelles, on pourrait réunir au Sahara, le nombre d'hommes qu'exigerait sa mise en valeur, puis les protéger contre un climat excessif et pourvoir à leur subsistance.

La réponse se trouve dans une importante communication du Dr Edmond Sergent, de l'Institut Pasteur d'Algérie (1) et il est bon de la faire connaître aux organismes intéressés.

---

(1) Edmond SERGENT. Le peuplement humain du Sahara. *Archives de l'Institut Pasteur d'Algérie*, t. 31, n° 1, mars 1953, pp. 1-45.

Il est exclu de trouver de la main-d'œuvre sur place. Les Nomades sont inaptes à tout travail et les Négroïdes qui cultivent les oasis sont trop peu nombreux.

Qui pourrait travailler au Sahara ? Des Blancs importés ou des Noirs importés ?

Le Noir résiste évidemment mieux à la chaleur que l'Européen, mais l'hiver saharien est froid. Il gèle la nuit et l'organisme doit supporter une différence de 30 à 35° dans le cours d'une journée. D'autre part, les Noirs supportent mal la grande sécheresse. En conclusion, les familles noires sont inaptes à l'acclimatement au Sahara. Seuls, des hommes pourraient être utilisés pendant quelques mois par an, sous surveillance médicale.

On peut d'ailleurs ajouter que l'Afrique occidentale et équatoriale française est fort insuffisamment peuplée, pour que l'on puisse en détourner une partie de la population.

En somme, si le Sahara doit un jour être exploité ce sera par les Blancs, soit Nord-Africains, soit Européens.

En ce qui concerne les Nord-Africains, on avait pensé un moment déplacer des Berbères en surnombre en Kabylie pour les installer dans le delta intérieur du Niger récemment irrigué. Un rapport documenté de Paul Rivet et Henri Labouret a fait connaître l'impossibilité physique, physiologique de ce transfert. La colonisation par des familles berbères est donc exclue. Quant aux Européens, ils ne peuvent guère se livrer à des travaux de force au Sahara, sauf temporaires. Il leur faudrait des habitations climatisées, une hygiène alimentaire spéciale et des séjours fréquents dans la métropole.

Les conclusions du Dr Sergent sont que les familles européennes sont inaptes à l'acclimatement au Sahara et que les hommes seuls peuvent venir y séjourner temporairement, dans les cadres, sans fatigue physique et sous surveillance médicale.

En somme, il ne faut pas compter sur l'homme pour exploiter le Sahara. Les Africains, Noirs et Blancs, le savent depuis longtemps, mais il était utile que cela soit dit par un savant éminent, car il existe encore des métropolitains qui ne connaissent pas très bien les conditions éventuelles du travail au Sahara, mais qui en parlent tout de même en faisant des projets singuliers.

Raymond Furon.

Édouard Le ROY

(1870-1954)

Avec Ed. Le Roy disparaît le meilleur défenseur du Bergsonisme et le dernier de cette étonnante lignée de spiritualistes acharnés : les « 4 B. » (Bergson, Boutroux, Blondel et Brunschvicg), Lachelier, Lagneau, Hamelin et Le Roy avaient conquis en l'espace de vingt ans (de 1885 à 1905) une incontestable hégémonie pour la pensée française, étouffant complètement sous leur poids le Nietzschéisme, l'idéalisme absolu comme le néo-hégélianisme anglo-saxon ou italien, et repoussant dans l'ombre le pragmatisme naissant. Successeur de Bergson au Collège de France, où il enseigna de 1914 à 1940, puis à l'Académie Française, Le Roy était aussi doué pour les recherches mathématiques (il était Agrégé de Mathématiques, Ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure — Section scientifique — et Docteur ès Sciences, mais aussi Membre de l'Académie des Sciences Morales depuis 1919) que pour la spéculation philosophique : épistémologiste et métaphysicien, il créa une sorte de nominalisme transcendantal, reposant sur un intuitionnisme spirituel. D'autres que nous pourrons dire avec plus de compétence la portée de son œuvre scientifique ; mais l'idée qui se dégage de sa philosophie est celle « d'un *homo spiritualis* distinct à la fois de l'*homo faber* et de l'*homo sapiens* » car « telle est la leçon qui se dégage du Christianisme », à la fois dans la philosophie première et dans la pensée de la Religion. Toujours passionné pour les nouvelles découvertes de la Science et de la Philosophie, Ed. Le Roy fut vraiment, au sens plein du mot, l'instigateur d'une « Philosophie nouvelle », qui, même dépassée, ne laisse pas de se renouveler constamment par les réactions qu'elle suscite et qu'elle ne cessera jamais de susciter.

Denis Huisman.

Utilisation de diverses techniques scientifiques dans l'étude physique de la déformation plastique des métaux [1]

par M. Raymond JACQUESSON,

Professeur à la Faculté des Sciences de Poitiers
et à l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique.

Lorsque M. le Professeur Bouligand m'a demandé de prendre dans mes recherches et dans les travaux de mon Laboratoire des exemples d'interactions entre différentes disciplines ou différentes techniques scientifiques, son intention n'était pas d'obtenir un exposé de philosophie ni un inventaire détaillé des résultats que mes collaborateurs et moi-même avons déjà obtenus.

Il s'agit, en réalité, de montrer dans un cas concret, très précis, comment une étude, d'aspect très modeste au départ, s'est peu à peu étoffée, en faisant appel à des méthodes d'investigation de plus en plus variées, pour résoudre les difficultés croissantes et les problèmes nouveaux apparaissant au cours des recherches.

Je n'ai pas la prétention de croire que nous soyons les seuls, dans mon Laboratoire, à œuvrer dans la direction que je vais indiquer. Si je ne parlerai principalement que de nos travaux, c'est seulement pour conserver à cet exposé son intérêt essentiel : un cas vécu d'élargissement d'un sujet initial avec cheminement des idées vers une théorie qui malheureusement n'est encore qu'ébauchée.

Torsion plastique.

Le point de départ modeste des travaux dont nous allons parler, a été, vers 1933, une phrase de M. Le Rolland, alors Professeur de Mécanique physique à la Faculté des Sciences de Rennes, auquel j'avais demandé un sujet de thèse : « Tordez un fil et regardez ce qui s'y passe ». Dans ce programme de travail, deux disciplines interfèrent : tordre un fil, mettre en jeu des forces, relève de la Mécanique ; étudier les variations de texture consécutive à la déformation nécessite des investigations de nature physique (rayons X, microscope, etc...). Cette première interaction de

(1) Conférence faite au Congrès de l'A. F. A. S. à Poitiers, le 20 juillet 1954 (Section *Philosophie des Sciences*), voir, p. 278, la conférence de Chimie de M. J. Amiel.

ces deux sciences, Mécanique et Physique m'avait, à vrai dire, un peu déçu. La jeunesse, avec son enthousiasme, aspire plutôt à la « haute Science » à laquelle elle espère bien faire faire des progrès décisifs et par surcroît très rapides. Tordre un fil ne répond pas précisément à ces aspirations légitimes, mais j'ai cependant suivi les directions qui m'avaient été données et, par tempérament, porté surtout mon attention sur l'aspect physique du phénomène et ses relations avec l'état mécanique dans lequel se trouvait le métal.

J'ai donc tordu des fils d'aluminium, métal propre et transparent aux rayons X, dans un faisceau X, tout en mesurant le couple de torsion nécessaire. La loi de proportionnalité des efforts aux déformations (loi de Hooke) s'est tout de suite révélée inapplicable, même pour les plus faibles torsions. L'aluminium est en effet un métal plastique dès qu'il est un peu recuit.

Que signifie cette expression : métal plastique ? Supposons une expérience de traction dans laquelle une tige de longueur initiale lo est soumise à une force croissante F suivant son axe. Elle subit un allongement l-lo. Si l'action de la force F cesse et si la barre revient à sa longueur initiale lo, la déformation est dite élastique. La courbe effort-déformation est parcourue reversiblement. Dans beaucoup de cas, cette courbe est une droite : les efforts sont proportionnels aux déformations, c'est la loi de Hooke (fig. 1*a*). Pour les métaux,

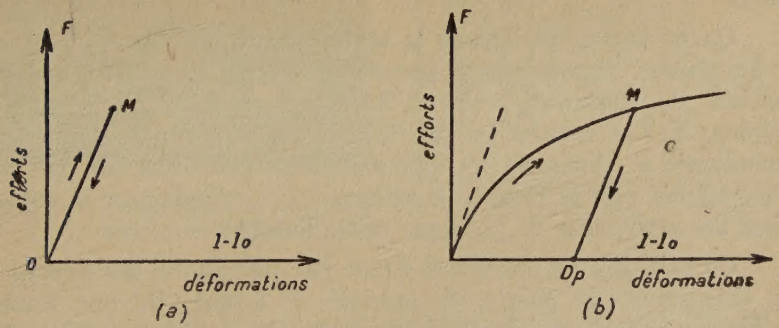


Fig 1.

en phase élastique les déformations restent faibles ; elles ne dépassent guère le centième de la longueur initiale. L'allongement est d'autre part indépendant de la durée d'application de l'effort. Cette loi de Hooke est à la base de la théorie de l'élasticité construite par les Mathématiciens. Mais, en fait, elle n'est jamais parfaitement vérifiée et ne représente qu'une première approximation, très utile d'ailleurs.

La force F augmentant peut amener la rupture du matériau, la déformation restant toujours « élastique » dans les états intermédiaires. Le matériau est dit *fragile* ou « *cassant* ». Les déformations restent toujours faibles. C'est le cas du verre et ce fait est traduit par l'expression : « Le verre ne plie pas ».

Mais dans la plupart des cas à la phase élastique, succède une phase « *plastique* » : le matériau s'allonge, la déformation peut devenir considérable (la barre peut doubler de longueur) sans que l'effort nécessaire augmente beaucoup. La courbe effort-déformation (force applique, allongement) a la forme de la figure 1b.

Outre la grande valeur de la déformation, cette phase plastique est caractérisée par trois faits :

a) il n'y a plus proportionnalité entre les efforts et les déformations ;

b) celles-ci dépendent de la durée d'application de la force : cas typique du fluage ;

c) elles ne sont pas réversibles : le métal déchargé conserve une déformation dite « permanente ». Un fil suffisamment tordu ou plié reste tordu ou plié.

Dans les expériences de torsion, les phénomènes sont plus compliqués que dans la traction, car les efforts ne sont pas homogènes : ils sont nuls sur l'axe et maxima à la périphérie de l'éprouvette.

Quant aux variations de la texture provoquées par la torsion et qui doivent nécessairement prendre naissance puisqu'il y a déformation du matériau, elles n'étaient pas décelables par les rayonx X : la texture polycristalline des fils employés est trop compliquée et dissimule les perturbations produites. Je me suis donc orienté vers la torsion de monocristaux cylindriques et entamé ainsi des recherches de physique cristalline (1).

On sait qu'un monocristal donne par diffraction des rayons X un diagramme de points (diagramme de Laue). Or une torsion faible du cristal modifie ce diagramme : les spots ponctuels s'allongent radialement, mais inégalement. L'un d'eux en particulier peut rester intact (fig. 2). D'autre part, la déformation macroscopique reste hélicoïdale, on vérifie en effet expérimentalement qu'une génératrice rectiligne est transformée en hélice. Pour établir le pont entre ses deux manifestations : allongement inégal des spots et déformation hélicoïdale, on peut faire l'hypothèse que le cristal initial s'est écartelé en petits blocs dont les différents plans diffrac-

(1) Thèse de Doctorat, 1943, Paris.

tants jouent le rôle de miroirs tournants étalant plus ou moins le pinceau X incident. Les déplacements de ces blocs posent alors un problème de géométrie soumis aux conditions mathématiques et physiques suivantes :

1° ils doivent être tangents à la déformation hélicoïdale d'ensemble ;

2° la fragmentation doit être compatible avec l'anisotropie du cristal ;

3° on doit retrouver quantitativement les différents allongements mesurés sur les diagrammes obtenus.

Le problème a été résolu grâce à quelques considérations d'analyse, de géométrie et d'optique et l'hypothèse de cette fragmentation prit ainsi corps, avec, en même temps cette idée que le déplacement des blocs ou cristallites était en grande partie conditionné par la déformation extérieure. Cet ensemble de déductions se trouva confirmé par l'étude des textures hélicoïdales obtenues

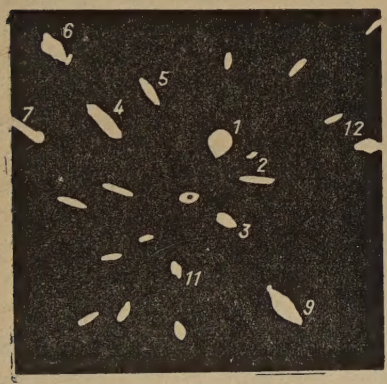


Fig. 2. — Diagramme de Laue d'un monocristal tordu.

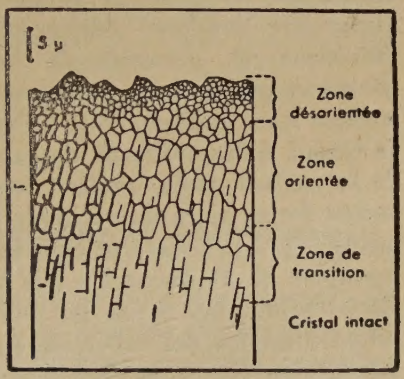


Fig. 3. — D'après G. Chaudron.

par des torsions importantes du monocristal et même aussi par celles obtenues après une série de torsions alternées : on assiste à des rotations de particules au sein du métal, ces particules se disposant finalement de manière à mettre une direction cristallographique donnée parallèle à l'axe de torsion. Ces rotations de particules solides au sein d'un métal, milieu essentiellement compact, ne peuvent guère se concevoir si l'on attribue à ces particules une forme propre et immuable. Il doit y avoir des recristallisations, des aménagements successifs des réseaux perturbés, et nous devinons l'existence d'une évolution à l'échelle atomique qui fait que le métal

tend à conserver sa texture réticulaire dans des volumes d'ordre de grandeur assez faibles, bien entendu, malgré un travail sévère de désagrégation de l'édifice cristallin, qui peut aboutir finalement à la rupture du métal. Le calcul des probabilités montre en effet qu'une couche très mince d'atomes ne peut exister entre deux particules de dimensions plus grandes par suite de l'action directrice de leurs deux réseaux cristallins. La diffraction des rayons X a permis de montrer que les dimensions minima de ces particules ne pouvaient descendre à moins de 10^{-4} cm environ. Nous reviendrons tout à l'heure sur cette évolution qui constitue un caractère dynamique de la déformation plastique.

Intervention de la chimie.

Dans ces premières études, je n'ai guère utilisé le microscope, c'est-à-dire l'optique, malgré le besoin évident de voir, avec mes propres yeux, les phénomènes étudiés. Mais un métal étant opaque, on ne peut qu'examiner sa surface. Il faut que ce qu'on y voit apparaître traduise fidèlement les perturbations produites à l'intérieur et permette de les interpréter. Or, l'observation microscopique à fort grossissement nécessite un polissage de la surface et ce polissage qui, à l'époque de mes premiers travaux ne se faisait qu'en utilisant des abrasifs, perturbait l'état cristallin de la surface polie, surtout avec l'aluminium. Cette couche perturbée forme alors un véritable brouillard, masquant la masse du métal (fig. 3). L'électrochimie est venue depuis à l'aide du métallographe. M. P. Jacquet a mis au point les méthodes du polissage électrolytique qui donne un poli parfait de la surface par dissolution anodique des aspérités. On polit un métal sans le toucher. La couche mise à nu n'est plus perturbée ; elle révèle bien l'état interne réel du métal et toutes les perturbations que vont lui faire subir la déformation plastique.

Cette technique a fait faire d'énormes progrès à la physique cristalline des métaux ; il suffit de citer, pour la France, les travaux du Laboratoire de Vitry, sous la direction de M. le Professeur Chaudron, de celui de l'Ecole des Mines, avec M. Crussard, et les résultats de M. P. Jacquet.

D'autre part, l'action chimique limitée de certains réactifs sur les surfaces cristallines ainsi mises à nu est localisée en certains points. La vitesse de dissolution étant fonction de l'orientation des cristaux (anisotropie), cette attaque grave le cristal suivant des « piqûres de corrosion ». Leur forme, de caractère géométrique généralement simple, dépend donc de l'orientation du cristal attaqué

et permet de trouver comment il se présente par rapport à la surface examinée. J'ai pensé que la corrosion chimique étant fonction du potentiel électrochimique, il devait être possible de provoquer l'attaque par action électrolytique, l'échantillon servant d'anode dans une cuve à électrolyse. C'est effectivement ce que nous avons montré au Laboratoire avec M. Manenc (5). A l'aide de cette technique très simple, sans négliger pour autant l'attaque chimique, nous avons pu réaliser avec une grande commodité des piqûres très petites qui donnaient l'orientation de particules de l'ordre de quelques microns et voir ces rotations dont je vous parlais plus haut (fig. 4).

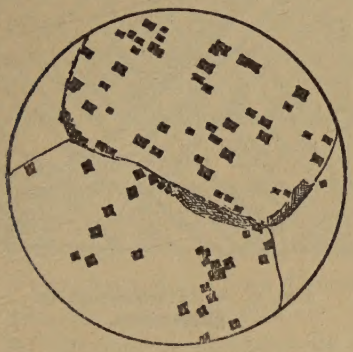


FIG. 4. — Piqûres de corosion. L'Aluminium cristallise dans le système cubique. Dans le grain inférieur, les piqûres carrées montrent que la face d'un cube est parallèle à la surface. Dans le grain supérieur, les piqûres sont rectangulaires : l'arête d'un cube est parallèle à la surface.

Torsions alternées : caractère particulier dû à l'écrouissage.

L'emploi combiné des rayons X, du polissage électrolytique et des attaques par piqûres a permis à M. Laurent (2) de faire une belle étude de l'action des torsions alternées sur l'état cristallin de tôles de différentes natures et en particulier sur celles d'aluminium. Dans les métaux recuits, le mécanisme fondamental, pour les petites déformations est le glissement : le cristal se déforme par couches qui glissent les unes sur les autres suivant des plans bien définis ; la surface libre de la tôle, primitivement plane, devient une sorte d'escalier ; d'une marche à l'autre il y a une différence de niveau. Les biseaux reliant les marches entre elles renvoient la lumière incidente, normale à la surface, dans une direction oblique, ce qui donne une ligne noire dans le champ du microscope : c'est ce qu'on appelle une ligne de glissement. Les lignes de glissement résultant de translations suivant des plans parallèles sont elles-mêmes

(2) Thèse, Paris, 1950.

parallèles. Elles vont très souvent d'un bord à l'autre du grain cristallin (fig. 5). Au fur et à mesure que la déformation plastique augmente, ces lignes deviennent de plus en plus serrées, mais leur écartement ne peut descendre au-dessous d'une certaine valeur (0 μ 2, pour l'aluminium) ce qui montre bien que le cristal n'est pas indéfiniment résoluble en bandes ou couches. Enfin il peut coexister plusieurs systèmes de bandes de glissement et le métal se divise en

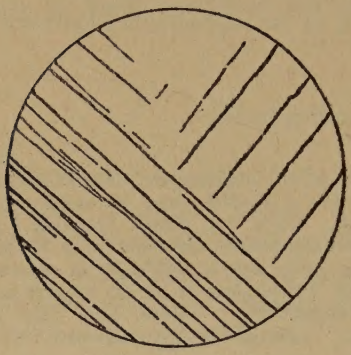


Fig. 5. — Lignes de glissement dans des grains cristallins d'aluminium.

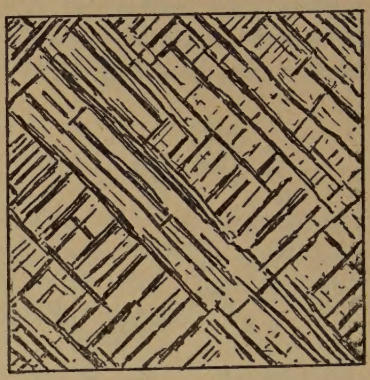


Fig. 6. — Interférences de glissements.

particules plus ou moins désorientées les une des autres (fig. 6). Il durcit, c'est le mécanisme de l'écrouissage par déformation plastique.

Au contraire, dans le métal déjà écroui avant l'application des torsions alternées, les glissements ne peuvent plus se produire étant bloqués dans cet amas de particules désorientées, ne présentant plus de plans de continuité propices aux glissements étendus. Par suite, les perturbations imposées au milieu écroui ne peuvent plus s'évader vers la surface comme précédemment et restent localisées là où elles se sont produites, entraînant un accroissement considérable de l'énergie potentielle du réseau déformé et par suite une certaine instabilité. Nous retiendrons ce caractère d'instabilité (état métastable) du milieu métallique écroui. Les torsions alternées forment dans le stade ultime des fissures dont l'orientation ne dépend que de la direction des efforts de cisaillement de torsion. Il convient de bien distinguer ces fissures, qui sont des discontinuités dans le métal, des glissements qui laissent le milieu bien continu, du moins en principe.

Déformations plastiques par laminage.

Ces études sur la déformation plastique par torsion — qui demanderaient d'ailleurs à être poursuivies — nous ont amené, dans un but de généralisation, à l'examen des textures de laminage, autre mode de déformation plastique consistant en un écoulement plan unidirectionnel. Ce sont deux collaborateurs, MM. Manenc (5) et Provost (4) qui ont été chargés de cette étude, c'est-à-dire de voir ce qui se passe dans une tôle au fur et à mesure qu'elle est réduite d'épaisseur par passes de laminage.

On savait depuis longtemps qu'un métal laminé acquiert peu à peu une texture orientée : ainsi les particules résultant du démantellement des gros cristaux finissent pas se disposer à peu près parallèlement les unes aux autres, leur orientation commune étant liée aux conditions géométriques de la déformation et, en particulier, à la direction de laminage.

Nous avons donc cherché à élucider le mécanisme de la formation progressive de cette texture, qui pour une tôle donnée varie d'un point à l'autre de l'épaisseur. Pour avoir une représentation exacte de la texture, il fallait donc étudier la texture d'une couche d'épaisseur Δe à une distance e d'une des faces de référence ; par exemple, on déterminait les textures de couches d'épaisseur 3/100 mm. et distantes de 1/10 de mm. dans l'épaisseur, la pellicule étudiée étant mise à nu par une dissolution électrochimique des couches supérieures.

Il nous est apparu que les méthodes d'investigation habituellement utilisées n'étaient pas suffisantes parce que qualitatives, et nous avons été ainsi amené à mesurer des intensités X diffractées, ces intensités étant après certaines corrections, proportionnelles aux nombres de particules réfléchissantes dans la direction examinée, donc parallèles en elles. On conçoit qu'il est alors possible d'avoir une représentation exacte de l'évolution des particules au cours du laminage. Mais mesurer des intensités X, suppose des chambres d'ionisation ou des compteurs Geiger-Muller, et nous avons été ainsi conduits vers l'électronique avec toutes les associations bien définies de circuits et de lampes qui conviennent pour que finalement, une lecture sur un cadran, nous donne une mesure relative du nombre de particules dans la direction considérée. Si, on trouve actuellement des dispositifs bien au point, il n'en était pas de même quand nos recherches ont commencé et plusieurs de mes collaborateurs, MM. Caisso (3) et Provost (4) en particulier, ont dû fabri-

(3) Caisso : Diplôme d'Etudes supérieures, Poitiers, 1953.
(4) Provost : Thèse Ingénieur-Docteur, Poitiers, 1954.

quer eux-mêmes tout l'appareillage nécessaire à l'alimentation d'un compteur et à l'analyse de ses réponses. Actuellement, il n'est guère possible qu'un Laboratoire de Métallurgie puisse se passer de spécialistes électroniciens, et nos aides techniques sont particulièrement précieux dans cette branche.

La détermination d'une texture de laminage fournit un bon exemple de la contribution de disciplines très différentes à une question de métallurgie et de mécanique du milieu cristallisé, aussi vais-je l'étudier d'un peu près, malgré le risque d'être trop technique.

On sait d'abord que les particules qui juxtaposées forment le métal tel que nous l'observons à l'œil nu et qui nous paraît homogène, sont des cristaux. Les atomes y sont, dans chacun d'eux, géométriquement disposés et peuvent être rangés sur des familles de plans équidistants et parallèles, dits réticulaires. L'orientation relative de deux particules est alors mesurée par l'angle des normales à la même famille de plans considérée dans l'une et l'autre de ces particules. A partir d'une origine O (fig. 7), menons des parallèles à ces normales N_1 et N_2 et portons sur ces demi-droites des segments $OP_1 = OP_2$ égaux à l'inverse $\frac{1}{d}$ de l'équidistance d des plans réticulaires considérés. Les points P_1 P_2 sont les *pôles* caractérisant la famille de plans choisie dans chacune des particules. Si les

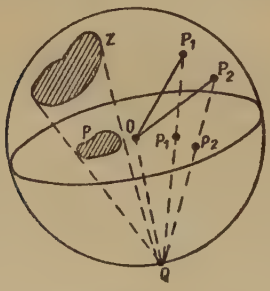


Fig 7. :
P_1, P_2 = pôles.
p_1, p_2 = projections stéréographiques.
Z = zone polaire.
p = sa projection.
Q = pôle de projection.
g = 80.
g = 400.

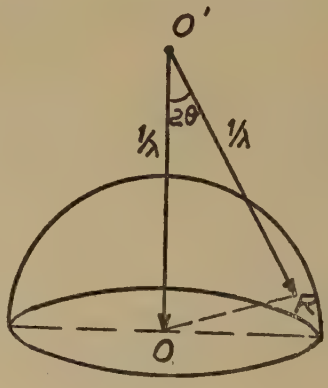


Fig. 8.

particules sont orientées au hasard les pôles P_i, se placent sur une demi-sphère de centre O qui en est uniformément tapissée. Au contraire, dans une texture dite « orientée », ces pôles se groupent sur certaines régions de cette demi-sphère, la densité des pôles

pouvant être variable à l'intérieur de chacune de ces régions. Pour avoir une représentation commode de ces régions, nous les projetons stéréographiquement sur le plan diamétral pour obtenir une figure analogue à une carte de géographie, une ligne d'égale densité de pôle jouant le rôle des lignes de niveau, c'est-à-dire d'égale altitude. Les figures obtenues s'appellent *figures de pôles*. Ce sont elles qu'il faut obtenir.

On sait d'autre part, qu'un faisceau de rayons X de longueur d'onde λ n'est réfléchi par diffraction par une famille de plans réticulaires que sous un angle θ défini par la relation de Bragg :

$$\lambda = 2d \sin$$

Le rayon réfléchi fait l'angle 2θ avec la direction du rayon incident : 2θ est l'angle de diffusion.

Cette formule se prête bien à une représentation géométrique simple, comme l'a indiqué Ewald (fig. 8.).

Dans la direction du rayon incident, on porte un segment $\frac{1}{\lambda} = \overrightarrow{OO'}$; de O' on porte de même le segment O'R dans la direction du rayon réfléchi ; l'angle de ces deux rayons est alors 2θ et l'on a :

$$OR = 2\,\frac{1}{\lambda} \sin\theta$$

ou $\lambda = \dfrac{2}{OR} \sin\theta$

La comparaison des deux formules montre que :

$$OR = \frac{1}{d}$$

donc que R doit se trouver sur la demi-sphère des pôles, relative à la famille des plans réfléchissants. On conçoit donc qu'en mesurant l'intensité X réfléchie dans une direction donnée, on puisse atteindre une valeur relative de la densité des pôles au point R de la sphère des pôles correspondant à cette direction.

Dans le cas particulier qui nous occupe, la détermination de la texture d'une couche mince, le faisceau X incident doit être rasant, de manière à n'explorer le métal que dans la pellicule superficielle. La construction précédente se présente alors ainsi (fig. 9) :

La sphère des pôles (O) est coupée par la sphère, lieu du point R de rayon $\frac{1}{\lambda}$ et de centre O' suivant un petit cercle (Γ).

Un compteur C reçoit le rayon réfléchi OR' parallèle à OR.

Si le compteur tourne autour de la direction O'O, le rayon OR' décrivant un cône de demi-angle 2 θ, il explore la sphère des pôles suivant Γ.

D'autre part, si avec le compteur fixe, l'échantillon tourne autour d'une normale ON à sa surface libre, on explore un parallèle de la sphère des pôles.

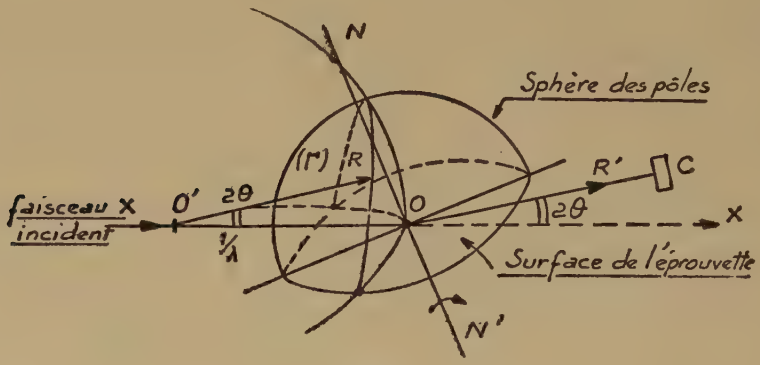


Fig. 9.

En associant les deux rotations, avec un rapport de vitesse constant, le point examiné décrit sur la sphère une courbe qui donne une spirale sur la projection stéréographique. On peut facilement faire correspondre un point de cette spirale au point correspondant de la courbe d'enregistrement du courant débité par le compteur et obtenir une projection stéréographique cotée sur laquelle on dessinera les courbes d'égale densité de pôles (5) (fig. 10).

Cette association de physique, d'électronique, de géométrie et de construction mécanique permet d'avoir automatiquement, sans que l'opérateur ait besoin d'être présent, toutes les données pour étudier avec précision une texture. La durée d'un essai a été ramenée à 2 h., alors que les méthodes antérieurement utilisées demandaient une douzaine d'heures. Elle pourrait être encore diminuée par l'emploi de chambres d'ionisation qui ne présentent pas d'inertie de réponse. Ce sera l'objet de travaux ultérieurs, dont la principale difficulté sera d'ordre électronique pour l'amplification des micro-courants continus donnés par la chambre.

(5) Maneno : Thèse Doctorat, Poitiers, 1953.

Principe d'adaptation.

Toutes ces études sont donc axées sur la mesure des désorientations subies par les particules cristallines provenant du démantellement des cristaux initiaux subissant la déformation plastique. Cette désorientation s'accompagne d'un durcissement du métal : c'est l'écrouissage ; la limite élastique est relevée ainsi que la charge de rupture. Le métal s'adapte, dans une certaine limite, aux efforts qui lui sont demandés : ceux-ci, s'ils sont un peu trop élevés, provoquent une légère déformation qui rend le métal plus tenace et susceptible de supporter les efforts demandés. Cette adaptation est

Fig. 10.

bien utile aux ingénieurs : elle neutralise certaines erreurs dans l'estimation des efforts demandés au métal. C'est ce que montre Bouasse, avec son style particulier, à propos du lancement d'un pont : « Le pont est construit sur une des rives, dans l'alignement des piles. Quand un bout se trouve prêt on le fait avancer sur un chemin roulant avec galets. Il va de soi qu'entre deux piles le pont est en porte à faux. Il subit au voisinage du dernier support un moment fléchissant considérable. Les efforts atteignent la limite de résistance, la poutre se voile... Elle proteste en craquant d'une ma-

nière sinistre... Il s'y produit des fissures. Quand le pont est en place, il faut supprimer les galets, descendre le tablier sur ses appuis... On soulage le malheureux pont avec des grues ou des vérins hydrauliques. Tout cela s'opère au petit bonheur, il va sans dire. Heureusement qu'une fois le pont en place, arrive le grand redresseurs de défauts, celui qui, dans les travaux publics, joue le rôle souverain : le pot de peinture. On peint et repeint... Tout est prêt pour la réception... La coupe de champagne, sans parler de la dépêche officielle. Aux épreuves on trouve toujours, pour les flèches, les nombres qu'il faut ! ».

Je pense que M. Bouasse a peut-être exagéré sa pensée en parlant de fissures, mais il est certain que, par la fabrication même, des constructions mécaniques, certaines régions sont amenées à supporter bien des efforts supérieurs à ceux qui ont été calculé, et entrent sans se rompre en phase plastique et s'adaptent aux efforts profitables.

Ce durcissement des métaux par écrouissage peut apparaître à un certain point de vue, comme une manifestation de la loi fondamentale de stabilité des équilibres. Les métaux s'opposeraient par une modification de texture et une amélioration corrélative de leurs propriétés mécaniques à une modification plus importante de leur forme sous l'influence des efforts extérieurs. Par une amélioration de leurs performances, ils seraient capables de traverser sans dommages appréciables les épreuves passagères qu'ils ont à supporter.

Il y a cependant une différence très marquée entre le comportement des métaux et des équilibres physiques ou chimiques que nous avons l'habitude d'étudier. Quand ceux-ci évoluent d'un état A à un état B ils passent entre ces deux extrêmes, par une infinité d'états qui sont eux-mêmes infiniment près de l'équilibre. Au contraire, le durcissement par écrouissage qui tend à s'opposer à une modification trop grande de sa forme, est le fait d'un processus d'instabilité : le métal écroui, durci, est dans un état métastable. Il possède par rapport au métal recuit, et encore plus par rapport au cristal parfait, une énergie potentielle latente qui a été mesurée. Elle est de l'ordre de la calorie par gramme quand l'écrouissage est poussé au maximum. Il s'en suit que, si les circonstances s'y prêtent, le métal écroui évoluera vers l'état cristallin parfait. Le recuit des métaux est l'exemple bien connu de cette évolution sous l'influence d'une température élevée.

La déformation, cause de recristallisation.

Ce qui est moins connu est le rôle que joue la *déformation* elle-même dans le déclenchement du mécanisme qui ramène le métal écroui durci vers un état cristallin plus stable et moins résistant.

J'en citerai quelques manifestations dont certaines sont assez spectaculaires. Leur étude est d'ailleurs en cours et les résultats récents obtenus n'ont pas encore été publiés.

Au cours de mes premières recherches (1), j'avais été amené à étudier les variations de la capacité d'amortissement des métaux. C'est une propriété extraordinairement sensible aux variations de texture, même à celles qui ne se manifestent pas dans un examen par micrographie ou rayons X. Pour la mesurer, il suffit en principe, d'utiliser le fil métallique étudié comme fil de suspension d'un pendule de torsion et de déterminer l'amortissement des oscillations de celui-ci. Les métaux recuits, à bonne recristallisation, les plus près possible de l'état cristallin stable ont toujours la plus faible capacité d'amortissement. Tout écrouissage augmente l'amortissement. Or on constate que l'amortissement du fil de suspension diminue spontanément sous l'influence du poids du pendule. La contrainte supportée par le fil suffit à déclencher le retour vers l'état stable, ainsi que l'aurait fait une élévation de température. Mais cette restauration du métal se fait dans des éléments de volume inaccessibles aux autres moyens d'investigation. On peut même donner au pendule un poids, donc au métal une contrainte, qui produise un maximum de capacité d'amortissement, quelque temps après le début de l'expérience, après quoi elle diminue pour atteindre une valeur beaucoup plus faible que celle du début de l'essai.

La montée de la courbe correspond à un écrouissage du fil par le poids qui y est suspendu, mais la restauration finit par l'emporter et le métal arrive finalement à un état plus stable que son état initial.

Cette évolution est lente : il faut des heures et même des jours pour la mettre en évidence.

Les expériences que je vais maintenant relater montrent que cette évolution peut être bien plus rapide.

Au cours d'une étude sur le laminage à chaud, M. Provost (4) a comparé la texture d'une tôle d'aluminium fortement réduite d'épaisseur par passes successives à celle d'une autre qui avait été maintenue pendant le même temps à la même température sans aucune déformation : c'est l'éprouvette laminée qui avait les plus gros cristaux, dès que la température des essais dépassait 300° environ. Le laminage loin d'avoir, comme on l'a vu, fragmenté à l'extrême les cristaux initiaux, avait au contraire favorisé la recristallisation. L'expérience durait cependant quelques heures.

Au cours de recherches sur la plasticité d'acier à haute température quand la vitesse de déformation est élevée, M. Rossard (6) avait aussi observé un grossissement inattendu des grains métal-

liques. Cette recristallisation mise en évidence par micrographie se produit en moins d'une minute, dès que la température dépasse un certain seuil.

Dans des essais récents effectués sur l'aluminium à 400°, des plages de recristallisation de l'ordre du 1/2 cm² se forment en quelques secondes par étirage rapide. Le même phénomène se produit même vers 250° (fig. 11). Il est évident que la texture

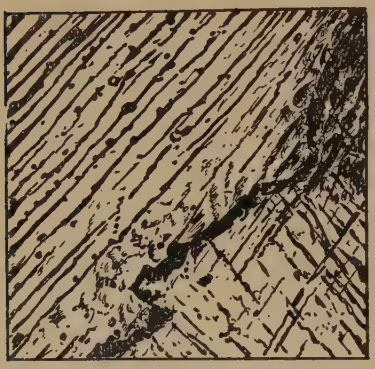
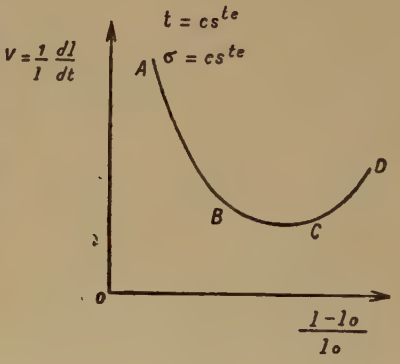


FIG. 11. — Les grains cristallins, initialement très petits forment de gros grains à surface ondulée. Joint de grain.



F.g 12.

des gros grains formés dans ces conditions ne peut être celle de cristaux parfaits, puisque le métal se déforme pendant le phénomène.

Enfin, au cours d'expérience sur le choc, M. Pironneau a pu constater que l'étirement du métal écroui provoquait une diminution de la microdureté du métal, la durée de la transformation étant de l'ordre de quelques milli-secondes.

On voit ainsi que la désorganisation de l'édifice cristallin produite par déformation peut faire place dans certaines conditions à une réorganisation extrêmement rapide, réduisant ainsi dans une grande proportion les qualités mécaniques acquises au début de l'écrouissage. Le métal perd en partie sa dureté, sa plus grande limite élastique : en terme de métallurgiste, il s'adoucit, et ceci au moment où les efforts qu'il doit supporter sont considérables, puisqu'ils déformaient déjà le métal très durci par l'écrouissage. Il en

résulte une déformation extrêmement rapide. D'où une forme très particulière des courbes de traction vitesse d'étirement $V = \frac{1}{l}\frac{dl}{dt}$ allongement, sous contrainte constante (6) (fig. 12).

Dans la partie AB, le métal subit un écrouissage durcissant d'autant plus accusé que l'allongement est plus grand. Pour une même contrainte, la vitesse d'allongement diminue. Puis intervient le phénomème de recristallisation adoucissante : il se superpose d'abord avec l'écrouissage. Le métal sous ces deux influences inverses ne durcit plus et la vitesse d'étirement tend (BC) à devenir constante quand Δl augmente. Enfin, la recristallisation devient prédominante et le métal adouci flue très vite (partie CD).

Il n'est pas interdit de supposer qu'à des températures ni trop basses, ni trop hautes, et pour les charges convenables, il y ait une alternance de ces effets durcissants ou adoucissants, si toutefois la rupture n'intervient pas trop tôt.

Que devient alors le principe de la conservation de l'équilibre ? Le métal paraît présenter deux modes de réactions bien différents aux sollicitations extérieures. Au début de la déformation plastique, celui du durcissement par écrouissage que nous avons déjà indiqué. Le métal tend à conserver sa forme en accroissant ses performances mécaniques, mais ceci aux dépens de sa texture qui devient de plus en plus perturbée et instable. Le second mode de réaction est d'ordre plus physique ; le métal sacrifie sa forme, il se déforme de plus en plus, mais en restaurant son édifice cristallin : c'est le véritable processus d'une évolution vers la forme d'équilibre stable, ou tout au moins aussi stable qu'il est possible dans les conditions expérimentales du moment.

Il est alors possible d'entrevoir une théorie physique générale de déformation plastique.

Qualitativement, ce phénomène de recristallisation spontanée provoquée par l'écrouissage peut être expliqué par l'instabilité du métal écroui.

Nous avons déjà dit que le début de la déformation plastique se manifestait par des glissements : les perturbations apportées en certains points à la texture cristalline peuvent se déplacer dans le réseau, ne laissant que des traces de désordre sur leurs parcours. Cette évasion des zones de haute perturbation, donc de grande énergie potentielle, vers l'extérieur du métal empêche donc l'accumulation trop grande d'énergie en certains points du réseau et par suite évite une instabilité trop accusée du milieu déformé.

---

(6) Rossard : Diplôme d'Etudes supérieure, Poitiers 1953.

Mais il n'en est pas de même quand le métal a été très déformé. Les perturbations apportées par les efforts extérieurs restent localisées aux endroits où elles se sont produites, il n'y a plus de glissements, comme le montrent très nettement les expériences de M. Laurent. Aussi la densité d'énergie potentielle augmente rapidement et la texture devient instable. Une température suffisante permet le déplacement des atomes qui se regroupent au mieux suivant un réseau plus voisin du réseau idéal à énergie minima.

La théorie de ce phénomène devra donc se rattacher à la thermodynamique statistique. Compte tenu de l'énergie due à la déformation et de celle acquise par élévation de température, il faudra déterminer la probabilité d'existence des textures obtenues. Il y a là matière à des études mathématiques ardues. Actuellement, l'étude expérimentale n'est pas encore assez poussée pour pouvoir préciser les paramètres entrant en jeu et leur influence relative, et pour donner des mesures qui serviront à la vérification de la théorie.

Conclusion.

Bien des travaux ont donc été entrepris depuis le modeste début que j'ai indiqué ; chacun d'eux a jeté une petite lumière sur cette déformation plastique, mais a montré qu'elle devait être considérée sous des aspects de plus en plus vastes. Cependant deux conclusions s'imposent :

L'une de caractère scientifique : les théories mathématiques de la plasticité qui ne tiennent pas compte de la texture physique du milieu plastique et de ses variations, ne peuvent qu'être grossièrement approchées sinon totalement erronées quand on les extrapole en dehors des domaines de température et de contraintes bien délimités. La matière est soumise à des lois physiques qui la font fluctuer ; toutes ses propriétés, et en particulier ses propriétés mécaniques en dépendent : dans cet ordre d'idée, le mécanicien doit aussi être physicien.

L'autre de caractère plus philosophique : l'étude d'une question, d'aspect initial très banal, exige au fur et à mesure qu'elle se développe, des connaissances et des techniques se rapportant à des domaines scientifiques souvent très éloignés. Il devient de plus en plus difficile à un même chercheur de s'assimiler de façon efficace les différentes fractions de ces domaines qui lui sont utiles pour progresser dans son travail. Le temps, aussi, lui fait défaut... Si la recherche purement individuelle est menacée, la voie reste cependant pleine de promesses pour le travail d'équipe, chaque membre

portant particulièrement ses efforts dans une direction déterminée, faisant profiter ses coéquipiers de cette superspécialisation et recevant d'eux, dans d'autres domaines, des services réciproques. Ainsi, les laboratoires deviendront des ruches productives avec la devise : « Un pour tous, tous pour un ».

R. Jacquesson.

LES LIVRES REÇUS

BETH (E. W.). — Les fondements logistiques des Mathématiques (Gauthier-Villars, Paris). 2.500 francs.

BIRKHOFF. — Hydrodynamique (Dunod, Paris).

BLANC-LAPIERRE (A.) et PERROT (M.). — Conductibilité électrique des lames minces (Mém. des Sciences Physiques, Gauthier-Villars, Paris). 1.100 francs.

COLOMBANI (M. A.). — Propriétés magnétiques des lames minces métalliques (Mém. des Sciences Physiques, Gauthier-Villars, Paris). 1.000 francs.

DEQUOY (Mlle N.). — Axiomatique intuitionniste sans négation de la géométrie projective (Gauthier-Villars, Paris). 1.250 francs

DOUCET (Y.). — Les aspects modernes de la Cryométrie (Mém. des Sciences Physiques, Gauthier-Villars, Paris). 1.650 francs

GAMOW (G.). — M. Tompkins s'explore lui-même (Dunod, Paris). 480 francs.

GOUDET (Georges). — Les fonctions de Bessel (Masson, Paris). 600 francs.

GRAY (J.). — Comment se meuvent les animaux (Dunod, Paris). 480 francs.

LOHSE (Richard P.), SCHADER (Jacques) et ZIETZSCHMANN (Ernest). — L'Architecture internationale de demain (Ed. Charles Gray, Paris).

MURRAY (Francis J.) et MILLER (Kenneth S.). — Existence Theorems for ordinary Differential Equations (New York University Press). 5 $.

POLI (I.) et DELERUE (P.). — Le calcul symbolique à deux variables et ses applications (Mém. des Sciences Mathématiques, Gauthier-Villars, Paris). 1.000 francs.

SNODGRASS (R. E.). — The Dragonfly Larva (Smithsonian Institution, Washington).

SNODGRASS (R. E.). — Insect Metamorphosis (Smithsonian Institution, Washington).

STANLEY-LIVINGSTON (M.). — High-Energy Accelerators (Interscience Publishers Inc. New York).

AIDE MÉMOIRE DUNOD. — Mathématiques générales, 2 vol. 480 francs.

AIDE MÉMOIRE DUNOD. — Métrologie générale, 2 vol.

AIDE MÉMOIRE DUNOD. — Electrotechnique générale.

Semaine d'Etude sur le problème des Microséismes (Pontificia Academia Scientiarum).

LA CENTRIFUGATION DIFFÉRENTIELLE EN HISTOCHIMIE ANALYTIQUE

P. F. CECCALDI,

Chargé de Recherches

(*Laboratoire de Biologie de la Faculté de Médecine de Paris*)

Un phénomène des plus communs dans la Nature est qu'à la sédimentation particulaire, due à la gravitation universelle, s'oppose la diffusion moléculaire due à l'agitation thermique : selon leurs dimensions, les micelles suivent l'une ou l'autre de ces deux actions et, dans les conditions normales, sédimentation et diffusion s'équilibrent apparemment. Mais l'on conçoit que cet état d'équilibre est instable ; il peut être déplacé dans le sens de la sédimentation au moyen d'un artifice, la centrifugation, qui tend à augmenter les forces de gravité ; ainsi, des molécules mêmes peuvent devenir sédimentables à des vitesses de l'ordre du million de tours-minute.

Fig. 1.

La Cytologie, s'intéressant plus aux organites qu'aux molécules en soi, n'aura pas à recourir à des moyens aussi puissants, on va le voir.

Quelles sont les lois générales qui régissent la centrifugation ? Une force, comme la pesanteur, appliquée à une masse lui communique un mouvement (donc une vitesse) et une accélération. A cette force fait exactement équilibre durant le mouvement de la masse, la résistance opposée par celle-ci, sa force d'inertie. Si la masse décrit une orbite circulaire de centre O, en chaque point de la circonférence, la direction du mouvement du mobile est la tangente à l'orbite, et un point quelconque M le mobile devrait prendre la direction M T : en effet, si la liaison entre M et O cessait, M s'échapperait tangentiellement à l'orbite circulaire, mais comme M est réuni à O par un axe, le mouvement effectué par le mobile est obligatoirement circulaire et tout se passe comme si une force F' tirait constamment le mobile vers le centre : c'est la *force centripète*, elle ne dépend que du mou-

vement du mobile et augmente avec lui ; la force d'inertie prend alors le nom de *force centrifuge,* elle est égale et opposée à la centripète.

L'efficacité d'un appareil doit s'exprimer en « gravité », qui est fonction du nombre de tours pour des constantes de construction données, essentiellement le rayon de la circonférence de rotation. Une formule d'ensemble, aisément simplifiable, résume les différents calculs qui permettent d'évaluer cette force centrifuge :

$$F = \frac{mv^2}{r} \text{ (force centrifuge).}$$

d'où

$$F = \frac{m\,(4\,\pi^2\,r^2\,N^2)}{r} \text{ vitesse circonférentielle).}$$

Soit :

$$F = m.\ 4\ \pi^2\ rN^2$$

D'après cette formule, il apparaît plus avantageux d'augmenter le nombre de tours N que le rayon de l'appareil, aussi est-ce vers des dispositifs permettant des vitesses de plus en plus grandes que se sont orientées les recherches des constructeurs.

Les appareils à centrifugation différentielle sont de divers types, le mouvement rotatoire étant imprimé soit par des moteurs, soit par de l'huile sous pression, soit par un gaz comprimé, soit par effet électro-magnétique :

— Les appareils à moteur ne peuvent guère donner plus de 25.000 t/m. en raison des forces de frottement et des risques de rupture ou de déformation qu'entraîneraient des vitesses plus grandes.

— Les appareils à huile sous pression sont des manières de turbines ; à chaque extrémité de l'axe de l'appareil, qui est évidé pour recevoir les tubes à centrifuger, sont placées deux turbines sur lesquelles agit un courant d'huile sous pression.

— Les appareils à gaz comprimé utilisent l'air, ou mieux encore l'hydrogène, qui est injecté sous une forte pression dans un stator supportant, sans axe matériel, un rotor dont la face inférieure est cannelée ; le gaz sert ainsi en même temps à la rotation et à la suspension du rotor. C'est en faisant varier la pression de gaz que l'on peut régler la vitesse de rotation.

— Les appareils électro-magnétiques sont les plus perfectionnés ; ils échappent aux irrégularités de rotation occasionnées par les inévitables irrégularités de pression de l'huile ou du gaz. Le rotor est supporté et entraîné magnétiquement et tourne dans le vide, ce

qui évite les effets calorifiques dus à la friction de l'air et dispense de l'obligation d'équilibrer rigoureusement l'appareil avant chaque emploi ; la régulation y est automatique, le courant étant contrôlé par l'ascension du rotor au cours de son mouvement rotatoire. C'est ainsi qu'on peut espérer atteindre les plus grandes vitesses avec une constance et une sécurité absolues.

Quels que soient la force ou l'appareillage employés, la préparation à centrifuger est contenue dans un récipient de quartz ou en matière plastique, de formes diverses, que l'on loge dans le rotor ; récipient et rotor sont munis de fenêtres pour permettre une observation optique en cours de rotation : la sédimentation est en effet suivie par l'absorption ou la réfraction d'un faisceau lumineux de longueur d'onde choisie, pour avoir un enregistrement ou un contrôle, continus ou rythmés, selon les besoins.

L'évaluation du nombre de tours se fait soit stroboscopiquement, soit électriquement et peut être enregistrée en même temps que la courbe de sédimentation.

Ces divers dispositifs doivent posséder une régulation thermique parfaite pour éviter distorsions ou ruptures des pièces mécaniques et aussi pour empêcher des courants de convection qui contrarieraient l'action centrifuge.

L'équilibration, en particulier celle du rotor, doit être rigoureuse et permanente, y compris et surtout en fin d'opération au moment du ralentissement ; les systèmes d'amortissement et les dispositifs de freinage doivent donc être particulièrement bien étudiés.

Mais pour l'étude cytologique, point n'est besoin d'aller jusqu'à la sédimentation moléculaire ; en se tenant dans une juste moyenne on peut obtenir une sédimentation satisfaisante des divers organites cellulaires. Cette méthode offre de grandes garanties de pureté et d'intégrité ; seules des entités préformées étant séparables, l'on court aussi peu que possible le risque d'avoir des artefacts, mais il n'est pas exclu que la centrifugation puisse déterminer des modifications structurales des molécules qui perturberaient plus ou moins la spécifité d'actions enzymatiques. L'avantage majeur de cette sédimentation, du point de vue pratique, est qu'elle fournit à l'Analyse des constituants cellulaires en quantités pondérables, permettant ainsi des études compositionnelles ou structurales jusqu'alors impossibles.

Du point de vue technique, il faut envisager la séparation quantitative de quatre fractions cellulaires :

1. le noyau (de 1 à 7 μ) ;

2. les gros granules, comprenant les mitochondries (de 1 μ environ ;

3. les petits granules, appelés encore microsomes (de 0,1 μ environ) ;

4. la fraction soluble surnageante, représentant le reste du cytoplasme.

On peut ensuite raffiner les séparations en jouant sur des vitesses plus grandes.

Les différents temps opératoires doivent être ainsi menés :

d'abord, destruction des membranes cellulaires pour libérer le contenu des cellules ; ensuite, recueil de ce contenu dans un milieu liquide non traumatisant ; enfin, obtention de fractions de propriétés physiques suffisamment distinctes pour avoir une sédimentation nettement séparée, tout en évitant une possibilité de réorganisation artificielle — ce sont autant de problèmes. En effet, la destruction des membranes ne peut se faire par un simple broyage : trop brutal, il risquerait de léser les délicats organites cellulaires, de les vider de leur contenu et de mêler des produits d'origines très différentes, voire de les neutraliser ou de les bloquer les uns par les autres, trop doux il n'atteindrait pas au but cherché qui est de dissocier les différents constituants figurés. On utilise actuellement un broyeur-homogénéiseur mécanique mais l'on envisage l'emploi des ultra-sons.

Le recueil des éléments ainsi libérés exige des conditions de milieu très strictes. Les milieux salins, même dits « physiologiques », facilitent des agglutinations et ne protègent pas les structures (les mitochondries en particulier) ; s'ils sont isotoniques, ils facilitent des échanges osmotiques qui peuvent modifier la composition intérieure ; s'ils sont hypotoniques, les mitochondries éclatent ; s'ils sont hypertoniques, elles se vident. Le degré d'ionisation du milieu est aussi important, les milieux s'acidifient au cours du broyage, leur neutralisation peut déterminer des floculations. Les plus satisfaisants paraissent être les milieux sucrés (saccharose 0,25 M) mais il ne sont pas parfaits, car ils peuvent faciliter des phénomènes d'adsorption de protéines solubles à la surface des granules isolés.

Le fractionnement doit avoir pour objet d'être quantitatif, c'est là sans doute la plus grande difficulté, car il est nécessaire, sans pertes, de faire des re-suspensions et des re-centrifugations successives et parfois nombreuses pour atteindre à un degré satisfaisant de pureté ; les critères en sont morphologiques (sur frottis et examen microscopique), soit analytiques si l'on connaît assez

déjà la nature chimique des granules isolés ou au contraire celle de ceux que l'on cherche à éliminer ; on contrôle ainsi la séparation successive de « populations » de pureté croissante. Certains artifices préliminaires peuvent aider à la séparation : digestions, dissolutions, précipitations, destructions diverses peuvent éliminer certains éléments indésirables ; par exemple, pour obtenir des noyaux à l'état pur, on peut recourir à l'emploi d'agents tensio-actifs ou de liqueurs de densités pour modifier l'allure de la sédimentation de ceux-ci par rapport aux autres éléments.

Cette méthode de centrifugation différentielle peut devenir d'application très générale et susceptible de nombreuses adaptations ou variantes. C'est ainsi par exemple que l'on peut suivre la sédimentation par observation directe au microscope et étudier le mode de séparation de certains constituants cellulaires. On peut conjuguer des méthodes radio-isotopiques aux méthodes de centrifugation différentielle et étudier des localisations très précises de substances radio-marquées, ou des métabolismes à l'échelon cellulaire et même infra-cellulaire.

Déjà les résultats obtenus en Cytologie en moins de dix ans sont extrêmement prometteurs. Les préoccupations techniques devenant moins grandes puisque la plupart des problèmes fondamentaux ont été résolus, on peut s'attendre dans ces prochaines années à une rapide généralisation d'emploi : Claude en a tracé la voie dans ses recherches sur la cellule hépatique, Gulick sur les noyaux en général, Larazow sur les particules lipoprotéiniques et glycogéniques, et bien d'autres encore, orientés vers des études plus spéciales, enzymologiques ou cancérologiques.

On est donc là en possession d'un moyen de séparation sans doute encore imparfait, mais fondamentalement valable et pratique. Il permet désormais une étude macro-analytique des composants infra-microscopiques de la Cellule, qu'un effort bientôt séculaire des Histologistes avait lentement préparée grâce à des colorations de plus en plus raffinées ou à des micro-réactions de plus en plus subtiles. D'un coup, la différenciation des constituants cellulaires est devenue possible, et il n'est pas douteux que cette moderne technique associée aux techniques classiques, n'apporte une impulsion nouvelle aux recherches histophysiologiques et histopathologiques pour autant qu'elles tendent à se dégager de la Morphologie pure.

P. F. Ceccaldi.

RÉFÉRENCES

Beams. — High speed centrifuging. *Rev. Mod. Phys.*, 1938, 10, 245-63.

The ultra-centrifuge. *Science in Progress*, sér. 2. Yale Un. Pr., New-Haven (Baitsell), 1940, 232-64.

High speed centrifuging. Reports on Progress in Physics. *The Phys. Soc. G. B.*, 1941, 8, 31-49.

The production and maintenance of high centrifugal fields for use in Biology and Medecine. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 1942, 43, 177-93.

Beams, Pickels. — The production of high-rotational speeds. *Rev. Sci. Instr.*, 1935, 6, 299-306.

Chauveau, Clément. — Méthode d'obtention quantitative des structures cellulaires à partir d'un même échantillon de tissu. *Arch. Sc. physio.* 1951, 5, 277-88.

Claude. — Mechanical separation of the morphological constituents of the cell *Trans. N. Y. Ac. Sc.*, 1942, 4, 79-85.

Deduve. — La séparation des constituants cellulaires par centrifugation fractionnée. *Exp. ann. Bioch. méd.*, 1952, 14, 47-72.

Henriot, Huguenard. — Sur la réalisation de très grandes vitesses de rotation. *C. R. Ac. Sc.*, 1925, 180, 1389-92.

Hogeboom. — Separation and properties of cell components. *Fed. proc.*, 1951, 10, 3, 640-5.

Longsworth. — Conference on the ultra-centrifufie, *Trans. N. Y. Ac. Sci.*, 1950 36, 9.

Skarstrom, Beams. — The electrically driver magnetically supported vacuum type ultra-centrifuge. *Rev. Sci. Instr.*, 1940, 11, 398-403.

Pour les Disques, la Radio, la Musique

CHANTECLAIR

Le disquaire du Quartier Latin

61, Boulevard Saint-Michel — **PARIS 5e**

Distributeur officiel des Grandes Marques de Radio, Tournedisques, Electrophones, Phonos, Magnétophones Télévision

Les Mammifères fossiles de l'Amérique du Sud et la Biogéographie

par Robert HOFFSTETTER.

Professeur à l'Institut des Hautes Etudes de l'Amérique Latine

Dans le domaine des Sciences de la Terre, l'Amérique du Sud pose un certain nombre de problèmes, dont l'intérêt dépasse largement le cadre local. A cause de ses répercussions, l'un d'eux, d'ordre paléogéographique, est particulièrement attachant.

En effet, les deux Amériques, que relie aujourd'hui un isthme étroit, ont été longtemps séparées par une barrière océanique. Leur isolement couvre une grande partie de l'ère Tertiaire et coïncide pratiquement avec l'Age des Mammifères, qui a vu l'extraordinaire épanouissement de cette classe d'animaux.

Il en est résulté, pour les Mammifères terrestres de l'Amérique du Sud, une histoire propre, qui constitue une des plus belles expériences naturelles d'Evolution à grande échelle qu'il nous soit loisible d'analyser. Plus exactement, c'est la comparaison de deux histoires parallèles des Mammifères, réalisées dans des domaines séparés, qui est significative et instructive.

CONTINENT MONDIAL ET DOMAINES ISOLÉS

Au cours du Secondaire, les Mammifères ont connu une longue histoire discrète, pendant laquelle ils n'ont joué qu'un rôle obscur. Leur épanouissement débute brusquement à l'aurore du Tertiaire, et se prolonge jusqu'à nos jours ; il couvre une durée que les spécialistes modernes estiment à 75 millions d'années.

Pendant cette période, le chapitre le plus classique de l'histoire des Mammifères terrestres s'est déroulé dans l'ensemble géographique constitué par l'Amérique du Nord, l'Eurasie et l'Afrique, ensemble auquel Simpson (1) a donné le nom de « Continent mondial » (*World Continent*). En fait, il ne s'agit pas d'une terre indivise, mais de blocs constituants, entre lesquels des communications intermittentes ont permis des échanges de faunes. Mais des bar-

(1) Simpson (G. G.), 1950. — History of the Fauna of Latin America. *Amer Scientist.*, vol. 38, p. 361-389.

rières biogéographiques ont souvent provoqué des isolements temporaires de ces divers blocs, et il en est résulté des particularités fauniques parfois profondes, spécialement marquées en ce qui concerne l'Afrique (1). Par ailleurs, la communication une fois rétablie, chaque migration a requis un certain temps, d'où des décalages chronologiques. Enfin, sur cette immense aire, une zonation et un parcellement climatiques ont empêché l'uniformisation du peuplement animal. Pas plus qu'aujourd'hui, la faune n'a jamais été strictement la même dans les divers blocs continentaux, ni même sur toute l'étendue de chacun d'eux. Cependant l'histoire des Mammifères y est fondamentalement similaire, en tout cas interdépendante, et peut être traitée comme un tout.

A grands traits, nous assistons à la multiplication et à la diversification des Mammifères qui, jusqu'alors si humbles, vont conquérir les nombreuses niches écologiques laissées vacantes par la disparition des Reptiles secondaires. Une sévère concurrence se manifeste entre les trois sous-classes existantes au début du Tertiaire.

Les derniers Multituberculés, lointains survivants de la faune jurassique, sont rapidement éliminés. Ils ne franchiront pas le sommet du Paléocène.

Les Marsupiaux, inhibés dès le début, conservent une taille réduite et ne montrent ni diversification, ni spécialisation marquée. Ce sont de modestes Sarigues, au régime omnivore, pour lesquelles l'habitat arboricole représente le principal refuge, mais qui se maintiendront cependant jusque dans le Miocène en Europe et en Amérique du Nord.

Au contraire, les Placentaires affirment rapidement leur prédominance, et leur évolution prend d'emblée un caractère explosif. Avec leurs trois cohortes initiales, Unguiculés, Glires et Férongulés, ils constituent au Paléocène et à l'Eocène un ensemble buissonneux, bourgeonnant, qui semble tenter des « essais » évolutifs dans les directions les plus diverses. Les rameaux sont alors si multiples, les intermédiaires si nombreux, les spécialisations si peu tranchées, que même le spécialiste éprouve de sérieuses difficultés pour classer les types innombrables parmi lesquels, par exemple, les proto-carnivores et les proto-herbivores sont encore structuralement très sem-

(1) L'histoire de la faune africaine et le cachet actuel de celle-ci sont si particuliers qu'on serait en droit de remplacer le concept de Simpson par celui d'un continent boréal (Eurasie et Amérique du Nord) et d'un continent africain, relativement indépendants. Cette division s'accorderait davantage avec la réalité, en opposant au bloc nordique les trois grandes terres australes, qui constituent autant de domaines isolés à des degrés divers (Afrique, Amérique du Sud, Australie).

blables. Certaines branches, peut-être prématurément spécialisées, ne connaîtront qu'un succès éphémère, et disparaîtront : c'est le cas des Tillodontes, Paléanodontes, Créodontes, Condylarthres, Pantodontes et Dinocérates. Ces éliminations, et la spécialisation croissante des branches survivantes, confèrent à la faune son cachet moderne, déjà bien indiqué dès l'Oligocène, et fortement accusé au Miocène. Il s'agit d'une remarquable radiation adaptative, qui correspond à l'occupation de chaque niche écologique par le type le mieux adapté. La disparition des intermédiaires a pour conséquence une séparation toujours plus nette d'un certain nombre de types bien caractérisés, qui représentent autant de rôles écologiques. L'ensemble constitue un équilibre, non pas statique mais fluctuant, sans cesse remanié par les modifications du milieu et par les tendances évolutives de chaque groupe, qui aboutissent à une spécialisation toujours plus étroite, entraînant un morcellement des rôles écologiques.

En dehors du Continent mondial, divers domaines, isolés de façon durable par une barrière océanique, vont connaître par là même une histoire propre.

Certains de ces domaines insulaires, antérieurement reliés au continent, ont pu recevoir un stock mammalien initial, dont la constitution dépend essentiellement de la date de l'isolement, et qui servira de point de départ à une évolution locale.

Mais en outre, l'état insulaire n'interdit pas de façon absolue l'arrivée de nouveaux éléments fauniques. On admet de plus en plus le rôle joué par les transports passifs, grâce auxquels les animaux terrestres ont pu franchir d'importantes étendues marines. Les nouveaux arrivés, s'ils rencontrent un milieu favorable, enrichissent la faune insulaire, et entrent en concurrence avec les éléments locaux. De tels apports sont toujours aléatoires, mais certaines circonstances peuvent les favoriser : étroitesse du bras de mer, présence de courants porteurs ou de chaînes d'îles relais, végétation tropicale, étendue des côtes du domaine isolé, etc... Par ailleurs, le facteur temps intervient pour rendre non négligeable une très faible probabilité. Enfin le mode de vie de certains animaux facilite leur transport : c'est ainsi que les Mammifères arboricoles ou amphibies se révèlent particulièrement aptes à jouer le rôle de « sauteurs d'îles » (*island hoppers* de Simpson).

Il est cependant des îles qui apparaissent particulièrement défavorisées à cet égard. Leur peuplement mammalien peut être nul. Il comprend tout au plus des Chauves-Souris et des Muridés, ces derniers accompagnant inévitablement toute installation humaine. Nous citerons pour exemple la Nouvelle-Zélande et la plupart des archipels polynésiens.

D'autres îles ont reçu des apports mammaliens restreints, constitués par des formes insuffisamment généralisées, déjà trop engagées dans une voie déterminée, ayant perdu par là même une grosse part de leurs potentialités évolutives. La radiation adaptative est alors limitée, incomplète ; elle laisse inoccupées de nombreuses niches écologiques et aboutit à une faune non équilibrée. C'est le cas des Grandes Antilles. C'est aussi celui de Madagascar, que son étendue pourrait faire considérer comme un continent, mais qui possède une faune nettement insulaire (1).

Par contre, deux domaines isolés, l'Australie (Notogée) et l'Amérique du Sud (Néogée) se singularisent par le fait qu'ils ont reçu des groupes-souches, capables d'une forte radiation adaptative ; ils ont pu constituer une faune mammalienne équilibrée, comparable dans ses multiples adaptations à celle du Continent mondial, mais réalisée à partir d'éléments différents.

L'Australie est isolée au moins depuis le Crétacé. Sa faune mammalienne comprend quelques énigmatiques Monotrèmes, qui représentent apparemment une relique d'un rameau très ancien. Les seuls Placentaires sont des Rongeurs, un Chien et l'Homme, tous arrivés récemment (géologiquement parlant). Mais la presque totalité de la faune indigène est constituée par des Marsupiaux, qui ont connu une histoire florissante, parallèle à celle des Placentaires du Continent boréal. Ils ont su s'adapter à des habitats et à des régimes alimentaires variés ; leur échelle de taille s'est grandement étalée, surtout au Pléistocène, qui nous a révélé l'existence de l'énorme *Diprotodon*. Cette radiation parallèle a abouti à de remarquables convergences, de sorte que certains animaux autochtones, tous Marsupiaux, ressemblent à des Chiens, à des Martes, à des Rongeurs, à des Taupes, etc..., dont ils ont le mode de vie et l'apparence externe. Cependant, le parallélisme n'est pas total : certains types manquent complètement, d'autres se sont orientés vers des modèles inconnus chez les Placentaires.

On ne connaît malheureusement, de cette longue histoire, que son aboutissement actuel, quelque peu complété par des archives pléistocènes et pliocènes (expédition Stirton, 1953) (2). De sorte

(1) Millot (J.), 1952. — La faune malgache et le mythe gondwanien. *Mém. Inst. Scient. Madagascar* (A), t. 7, fasc. 1.

1953. — Le Continent de Gondwana et les méthodes de raisonnement de la Biogéographie classique. *Ann. Sc. Nat., Zool.*, II[e] série, t. 15, p. 185-219.

(2) Des dosages récents du contenu des os en fluor (ou plus exactement de l'indice F/P_2O_5, qui croît avec l'âge géologique) tendent cependant à démontrer que divers fossiles australiens appartiendraient au Tertiaire. Voir à ce sujet : Gill (E. D.), 1953. — Australian Tertiary Marsupials, *Austr. Journ. Sc.*, vol. 16, p. 106-108.

qu'il est impossible de restituer en détail les phases de cette conquête d'un Monde par les Marsupiaux, conquête qui a dû comporter bien des essais stériles, des éliminations, des substitutions écologiques, des étapes de perfectionnement, que nous pouvons tout au plus soupçonner.

L'autre grand domaine isolé, l'Amérique du Sud, apparaît beaucoup plus instructif. Sa faune actuelle, et plus encore sa faune fossile, montrent un partage des rôles écologiques entre Marsupiaux et Placentaires. Mais ici, une série continue d'archives paléontologiques nous permet de remonter jusqu'au Paléocène supérieur. Malgré de grosses lacunes qui subsistent encore dans nos connaissances, il nous est possible de recenser le fonds initial, d'observer l'arrivée de formes nouvelles, de suivre les essais plus ou moins heureux de chacun des groupes en évolution, et la réalisation d'un équilibre faunique qui représente un cas unique de réussite simultanée des Marsupiaux et des Placentaires.

Une autre particularité de l'histoire de l'Amérique du Sud est le rétablissement tardif d'une connexion avec le Continent mondial, avec comme conséquence une rupture de l'équilibre local par une mise en compétition de deux ensembles fauniques évolués séparément. D'où l'intérêt prodigieux de cette histoire, qui représente peut-être la plus belle page qu'il nous ait été donné de déchiffrer dans le livre de l'Evolution.

APERÇU HISTORIQUE

Dès les premiers contacts avec le Nouveau Monde, les observateurs ont été frappés par le contraste entre deux ensembles fauniques actuels, curieusement superposés aux deux aires que nous distinguons aujourd'hui comme Amérique latine et Amérique anglo-saxonne.

Alors que la faune nord-américaine s'apparente clairement à celle de l'Eurasie, l'Amérique latine (que les biogéographes désignent sous le nom de Région néotropicale) présente un cachet très original. En fait, sa faune actuelle est l'aboutissement d'une histoire complexe, à la lumière de laquelle on doit distinguer de vrais autochtones, tels que Sarigues, Cænolestes, Paresseux, Fourmiliers, Tatous, Singes platyrrhiniens, Rongeurs apparentés aux Cobayes ; et des réfugiés devenus endémiques : Jaguar, Kinkajous et Coatis, Ours des Cordillères, nombreux Canidés, Lamas, Pécaris et Tapirs néotropicaux.

Cette originalité actuelle était plus marquée encore dans le passé. Les sédiments continentaux sud-américains contiennent les restes de formes extraordinaires, aujourd'hui éteintes. Leurs osse-

ments ont de tout temps attiré l'attention des populations indigènes, avant même l'arrivée des Européens. Et leurs dimensions inusitées ne pouvaient que confondre l'imagination, dans un continent où rien dans la faune actuelle, ne pouvait servir d'élément de comparaison. D'où des légendes tenaces, qui ont trait à une race disparue d'Hommes géants, légendes soigneusement recueillies, commentées et adaptées par les chroniqueurs ; des relations savoureuses décrivent complaisamment ces monstres, et leur prêtent des mœurs hors nature qui auraient provoqué la colère divine.

Cependant, l'étude des faunes fossiles sud-américaines ne devait pas tarder à sortir de cette phase pré-scientifique. A tel point que, dès son éclosion, la Paléomammalogie a reçu les apports originaux de ce lointain continent.

Dès 1789, le squelette d'un animal géant trouvé dans le lœss pampéen des bords de la rivière Lujan, à quelques lieues de Buenos-Aires, est envoyé au Cabinet royal de Madrid, où il est monté et dessiné par J.-B. Bru. En 1796, d'après des planches qui lui sont communiquées ; Cuvier écrit à son sujet un rapport détaillé, dont un extrait paraît dans le Magasin Encyclopédique. C'est le premier acte de baptême d'un Mammifère fossile sud-américain, qui reçoit le nom de *Megatherium americanum*, et qui est reconnu comme un parent gigantesque des humbles Paresseux actuels.

Presque au même moment, Jefferson, alors vice-Président des Etats-Unis, fait connaître l'étrange *Megalonyx*, des cavernes de Virginie, d'abord considéré comme un grand Carnivore, mais dans lequel on reconnaîtra bientôt un émigré d'origine néotropicale, apparenté au *Megatherium*.

Au XIX^e^ siècle, de grands voyageurs sillonnent l'Amérique du Sud. Ce sont notamment Humboldt (1802), Sellow (à partir de 1814), d'Orbigny (1828-29), Darwin (1831-36), Castelnau et Weddell (1843-46), Seguin (vers 1855-56), etc... Ils rapportent ou envoient en Europe des matériaux fossiles, sur lesquels Cuvier, Weiss, d'Alton, Owen et Gervais ont écrit des mémoires fondamentaux.

Ainsi se dessine peu à peu la curieuse physionomie de la faune pampéenne, avec ses Edentés cuirassés (*Glyptodon*), ses Paresseux gigantesques (*Megatherium, Mylodon, Glossotherium, Scelidotherium, Lestodon*), ses Ongulés particuliers (*Toxodon, Macrauchenia*, etc...), auxquels s'ajoutent des représentants sud-américains de groupes plus classiques (Mastodontes, Chevaux, Ours, etc...). Des gisements productifs quaternaires sont découverts jusque sous l'Equateur, à plus de 3.000 m. d'altitude. En outre, ces premières

recherches permettent déjà de soupçonner l'existence de l'extraordinaire faune miocène de Patagonie, dont le genre *Nesodon* (Owen, 1846) est le premier témoin nommé.

D'autres savants européens se fixent en Amérique du Sud, et ouvrent l'ère des recherches paléontologiques locales. Au Brésil,

Fig. 1. — Principaux gisements de Mammifères tertiaires en Amérique du Sud. En hachures, Eogène ; en pointillé, Néogène. *P*, Paléocène : *E*, Eocène ; *O*, Oligocène ; *M*, Miocène ; *Pl*, Pliocène.
(En partie d'après Simpson, Stirton, etc...)

le Danois Lund se consacre dès 1834 à la riche faune des cavernes de Lagoa Santa. En Argentine, le Français Bravard, le Suisse Roth, l'Allemand Burmeister apportent d'importants compléments à la connaissance des fossiles pampéens.

A partir du dernier quart du XIX[e] siècle, un nom va dominer la paléontologie sud-américaine, celui d'Ameghino. Deux frères, Carlos, l'explorateur, et Florentino, l'homme de laboratoire, constituent une association féconde. Un travail énorme (les œuvres complètes de F. Ameghino emplissent 24 forts volumes), pourtant sur tout le territoire argentin, y compris la Patagonie, a pour résultat l'établissement d'une échelle stratigraphique et la description des faunes successives qui lui correspondent. Tout ne pouvait être parfait dans une œuvre aussi vaste, mais son apport est monumental, malgré les critiques parfois injustes auxquelles elle a donné lieu. Certes, Ameghino a eu tendance à exagérer l'ancienneté de ses faunes, mais il a su établir leur exacte succession. Certes, il a édifié des arbres généalogiques fragiles, en confondant souvent (n'était-il pas excusable ?) de troublantes convergences avec de vraies affinités, mais les analogies anatomiques ont été remarquablement dégagées. Certes, il a pulvérisé les genres et les espèces, peut-être parce qu'aucune particularité ne lui échappait, mais ses descriptions sont d'une précision peu commune, et l'on assiste aujourd'hui, après un abandon provisoire, à la revalidation de bien des noms qu'il avait proposés. On remarquera d'ailleurs qu'il est par trop facile de faire état de notions et de méthodes acquises ultérieurement pour saper les travaux des pionniers de la Science. Aujourd'hui, le nom d'Ameghino est sorti grandi des luttes qui l'ont entouré.

Les Ameghino ont eu en Argentine de dignes successeurs, avec Rovereto, Kraglievich, Castellanos, Cabrera, Bordas, Rusconi, Kraglievich jun., Reig, etc...

Les Européens ont aussi apporté leur contribution, avec Branco, Lydekker, Gaudry, Nordenskjoeld, Pompeckj, Sefve, Winge, Boule, Piveteau, etc...

Les Nord-Américains se sont plus spécialement intéressés aux faunes tertiaires, étudiées par Scott, Sinclair, Loomis, Riggs, Patterson, Simpson, Stirton, etc...

Dans les dernières années, l'attention s'est surtout portée sur les terrains tertiaires de la zone intertropicale, en Haute-Amazonie (Patterson), au Vénézuéla (Stehlin, Hopwood, Collins, Schaub, Simpson), en Colombie, où une belle succession, remontant jusqu'à l'Eocène supérieur, a été décrite par Stirton (1) ;

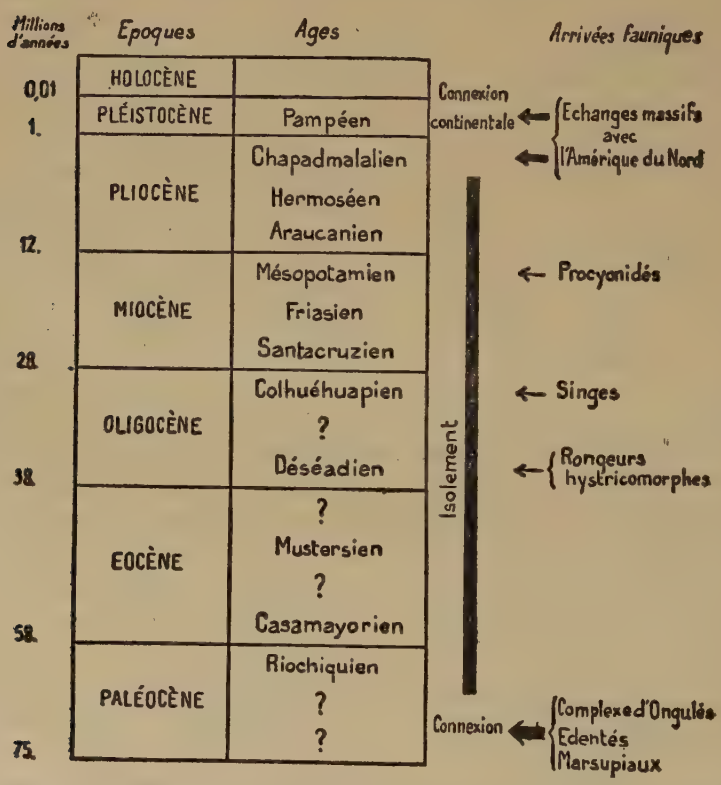
(1) Stirton (R. A.), 1953. — Vertebrate Paleontology and Continental Stratigraphy in Colombia. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, vol. 64, p. 603-622.

enfin la dernière découverte retentissante concerne la belle faune paléocène d'Itaborai, près de Rio de Janeiro, excellemment décrite par Paula Couto (2).

Ces dernières observations ont montré que, contrairement à ce qu'on a pu croire pendant un temps, l'Amérique du Sud constitue un ensemble unique, dont les différences fauniques s'expliquent par une zonation climatique plus ou moins marquée.

On peut admettre pour l'ensemble l'échelle stratigraphique définie en Argentine, et qui a été précisée par Kraglievich, Frenguelli, Castellanos, Feruglio (3) et Simpson (4).

Ses termes essentiels apparaissent dans le tableau I.



(2) Paula Couto (C. de), 1952. — Fossil Mammals from the beginning of the Cenozoic in Brasil.
Amer. Mus. Nov., n° 1559, 27 p. ; n° 1567, 26 p. ; n° 1568, 16 p.
Bull. Amer. Mus. Nat. Hist., vol. 99, art. 6, p. 359-394.

(3) Feruglio (E.). 1949. — Descripciôn geolôgica de la Patagonia, 3 vol., Buenos Aires.

(4) Simpson (G. G., 1940. — Review of the Mammal bearing Tertiary of South America. *Proc. Amer. Phil. Soc.*, vol. 83, n° 5, p. 649-709.

CONNEXIONS ET ISOLEMENT DE L'AMÉRIQUE DU SUD

Les Mammifères tertiaires sud-américains imposent l'idée d'un long isolement. Pour dégager les caractères chronologiques et géographiques de celui-ci, il serait nécessaire d'étudier les sédiments marins et continentaux de la région néotropicale, et les faunes qui leur correspondent, de dresser des cartes paléogéographiques où figureraient les tracés des rivages, les altitudes, les parcellements climatiques, les aires de répartition des plantes et des animaux aux divers âges géologiques. Il serait alors possible de localiser, dans le temps et dans l'espace, les barrières qui ont pu s'opposer aux échanges fauniques.

En fait, l'inventaire complet des dépôts et de leurs faunes est difficile à réaliser : des témoins importants ont disparu par érosion ou par immersion ; d'autres sont d'un accès difficile. Les expéditions, les sondages, longs et coûteux, sont surtout orientés vers des fins économiques et ne peuvent avoir la prétention d'apporter une information complète.

Il est cependant possible, grâce à des comparaisons de faunes, d'opérer des interpolations avec une sécurité acceptable. Par exemple, la présence de Foraminifères identiques dans un sédiment oligocène du Vénézuéla et des côtes occidentales de la Colombie tend à prouver l'existence d'une communication marine entre le Pacifique et la mer des Antilles, isolant l'Amérique du Sud. De même, les caractères d'une faune mammalienne du Pliocène inférieur du Honduras (McGrew) conduisent à admettre que ce territoire avait alors une liaison continentale avec l'Amérique du Nord, tandis qu'une barrière le séparait de la Colombie.

Eléments de la Faune Sud-Américaine

Les divers groupes qui composent la faune néotropicale n'apparaissent pas simultanément en Amérique du Sud. Celle-ci a reçu des apports successifs, qui constituent trois « strates fauniques » (*faunal strata* de Simpson) :

1°) un fonds initial, déjà présent dans le plus ancien niveau fossilifère connu, c'est-à-dire le Paléocène supérieur de la Patagonie et du Brésil, comprend des Marsupiaux, des Edentés et un complexe d'Ongulés ;

2°) des immigrants oligocènes viennent brusquement s'ajouter à la faune locale ; il s'agit d'une part de Rongeurs « hystricormorphes » apparus au Déséadien ; d'autre part de Singes platyrrhiniens, dont les premiers représentants connus appartiennent au

Colhuéhuapien de Patagonie, mais dont l'ancienneté pourrait être un peu plus grande dans la zone tropicale ;

3°) des immigrants tardifs, manifestement d'origine nord-américaine, sont précédés au Mésopotamien par quelques Procyonidés ; mais les grandes vagues d'immigration correspondent au Chapadmalalien et au Pampéen, et comprennent des Cricétidés, Ecureuils, Lagomorphes, Mustélidés, Canidés, Ursidés, Félidés, Mastodontes, Chevaux, Tapirs, Pécaris, Cervidés et Camélidés.

Ces arrivées successives ont conduit les auteurs à supposer l'existence de connexions continentales temporaires entre l'Amérique du Sud et divers continents, considérés comme les berceaux des groupes introduits. Trois liaisons ont été envisagées, qui concernent l'ensemble Antarctide-Australie, l'Afrique, et enfin l'Amérique du Nord. En outre, la présence d'éléments sud-américains dans la faune des Antilles a parfois été expliquée par une communication terrestre.

Possible connexion avec l'Antarctide et l'Australie

C'est surtout pour expliquer les analogies relevées entre les Marsupiaux fossiles néotropicaux et certains groupes australiens que l'on a fait appel à une liaison qui aurait uni, au Crétacé, l'Amérique du Sud à l'Australie, par l'intermédiaire de l'Antarctide. En particulier Rütimeyer (1867) a énoncé la théorie de la bipolarité des faunes mammaliennes : alors que le centre de dispersion des Placentaires est certainement holarctique, celui des Marsupiaux pourrait se situer dans un grand continent austral, aujourd'hui morcelé. Avec des variantes, la même théorie a été soutenue par Huxley, Ameghino, Osborn, Sinclair, Wood, Cabrera, Du Toit, etc... Deux points essentiels, sur lesquels insistent ses défenseurs modernes, comme R. Lavocat (1), lui servent de base : 1°) Marsupiaux et Placentaires ont trop d'analogies dans leurs potentialités adaptatives pour qu'ils aient pu se développer parallèlement dans un même berceau ; il est probable qu'un isolement géographique les a mutuellement protégés dans leurs débuts ; 2°) la répartition des Marsupiaux fossiles parle en faveur d'une origine australe ; alors que les quelques formes nordiques sont peu spécialisées et appartiennent à une seule famille (Didelphidés), les Marsupiaux d'Australie et d'Amérique du Sud ont subi une énorme diversification, qui a abouti notamment à des formes carnivores (Dasyuroïdes australien, Borhyænoïdes sud-américains) entre lesquelles on relève d'incontestables analogies, malgré leur isolement géographique.

(1) Communication verbale.

Dans le cadre de cette théorie, les Didelphidés nordiques, connus en Amérique du Nord depuis le Crétacé supérieur, seraient des émigrés précoces issus de la souche australe, et qui auraient utilisé une connexion établie à ce moment entre les deux Amériques.

C'est vers la même date que les deux grandes sous-classes de Mammifères auraient commencé leur diversification dans leurs berceaux respectifs. Au Paléocène, quelques groupes Placentaires, notamment les herbivores (mais aussi les Edentés), sans doute avantagés par rapport à leurs homologues marsupiaux, auraient réussi à conquérir sur ceux-ci le domaine sud-américain. Au contraire, les Créodontes nordiques et les Borhyænoïdes néotropicaux, probablement équivalents, se seraient maintenus sur leurs aires respectives.

On remarquera que, si la différenciation des Borhyænoïdes a précédé l'arrivée des immigrants Placentaires, il est presque nécessaire d'admettre aussi l'existence, dans le paléocène ancien, de Marsupiaux herbivores sud-américains, qui auraient été éliminés par les Protongulés. D'autre part, pour rendre compte des faits connus, il faut supposer une rupture précoce des connexions australes, entraînant un isolement de l'Australie (ou de l'Antarctide) et protégeant celle-ci contre l'invasion des Placentaires.

Cette interprétation des faits est vraisemblable. Mais elle demande une double confirmation, car elle implique l'existence de Marsupiaux fossiles antarctiques et aussi celle de Marsupiaux herbivores dans le Paléocène ancien de l'Amérique du Sud, deux points sur lesquels nous n'avons aucune information, positive ou négative.

Une position toute différente a été défendue par Matthew (1), Simpson (2), Piveteau (3), etc... Elle a l'avantage de serrer au plus près les faits connus, en évitant d'échafauder des hypothèses incontrôlables, et qui ne s'imposent pas.

Puisque les seuls Marsupiaux connus au Crétacé supérieur ont été trouvés en Amérique du Nord, et qu'ils correspondent à des formes généralisées, on est en droit de supposer qu'ils forment le stock primitif du groupe. Inhibés dans leur berceau par l'évolution explosive des Placentaires, ils n'auraient réussi à se diversifier que

(1) Matthew (W. D.), 1915. — Climate and Evolution. *Ann. New York Ac. Sc.*, 24, p. 171-318.

(2) Simpson (G. G.), 1939. — The development of Marsupials in South America. *Physis.*, t. 14, p. 373-398.

1953. — Evolution and Geography, 64 p., Condon Lectures, Eugene, Oregon.

(3) Piveteau (J.), 1941. — L'histoire biogéographique des Marsupiaux et le problème de l'Antarctide. *Mammalia*, t. 5, n° 2, p. 33-49.

dans des territoires plus ou moins isolés, qu'ils auraient pu atteindre par des migrations vers le Sud. Un transport passif leur aurait permis de gagner l'Australie, déjà séparée du Continent mondial, et d'y réaliser toutes leurs potentialités adaptatives grâce à l'absence de la concurrence des Placentaires. Une connexion continentale intervenue à la fin du Crétacé et au début du Paléocène aurait rendu possible leur passage en Amérique du Sud, en compagnie de Placentaires encore fort peu différenciés ; dans la lutte pour la conquête des rôles écologiques, une sorte de course de vitesse aurait été gagnée par les Placentaires en ce qui concerne le régime herbivore, par les Marsupiaux pour le régime carnivore ; et ainsi les premières conquêtes d'un groupe inhibant les tentatives de radiation de l'autre dans la même direction, il en serait résulté un partage des rôles écologiques. Il faudrait alors interpréter les ressemblances entre Borhyænoïdes et Dasyuroïdes comme le résultat d'une différenciation parallèle vers le même mode de vie, à partir d'un même groupe ancestral.

Telles sont les deux thèses qui s'affrontent. La seconde rallie la majorité des suffrages actuels. Mais il faut reconnaître que ses bases sont encore en partie hypothétiques. Sa principale faiblesse concerne l'origine de la faune australienne : pour relier celle-ci aux formes fossiles nord-américaines et européennes, il est nécessaire de supposer l'existence d'intermédiaires asiatiques, encore inconnus.

Connexions supposées avec l'Afrique

Une communication tertiaire de l'Amérique du Sud avec l'Afrique a longtemps été admise comme une nécessité, à tel point que Wegener, dans ses schémas des dérives continentales, a maintenu le contact entre les deux blocs jusque dans l'Eocène.

C'est qu'en effet, Ameghino avait relevé, dans les éléments du fonds initial sud-américain, de nombreuses affinités avec des groupes africains : Pyrothères et Proboscidiens, Notongulés et Hyracoïdes, Edentés xénarthrés et Pangolins, etc... En fait, les analogies observées ne sont que des convergences ou des parallélismes, et l'on peut considérer aujourd'hui comme démontrée la séparation des deux blocs pendant le Paléocène et l'Eocène.

Cependant, un problème reste posé, qui concerne les immigrants oligocènes. Au Déséadien apparaissent brusquement des Rongeurs, dits hystricomorphes, parce qu'ils rappellent les Porcs-épics africains et aussi les *cane rats* et les *rock rats* du même continent. L'origine des Singes néotropicaux, connus depuis l'Oli-

gocène supérieur mais peut-être arrivés un peu plus tôt, a été également recherchée en Afrique. Il a été suggéré qu'un pont transatlantique temporaire aurait servi de voie d'accès pour ces immigrants.

Mais l'existence d'un tel pont — déjà improbable en soi — ne constituerait pas une explication satisfaisante pour une migration unilatérale, et limitée à deux groupes. Si l'on remarque que ces deux groupes présentent des tendances arboricoles, et que leur arrivée ne semble pas simultanée, on a plutôt l'impression qu'il s'agit de « sauteurs d'îles ». Mais le problème de leur lieu d'origine reste entier.

Il peut s'agir de l'Afrique, encore que l'Atlantique représente une barrière formidable. Géographiquement, l'Amérique du Nord serait une base de départ beaucoup plus vraisemblable ; mais sa faune fossile ne contient ni Singes, ni Rongeurs hystricomorphes. Il est vrai que Gidley, Matthew et Simpson ont supposé que les Singes sud-américains pourraient constituer un rameau parallèle, indépendant de celui de l'Ancien Monde, et issu des Lémuriformes de l'Eocène nord-américain. D'autre part divers auteurs, notamment Wood (1), Lavocat (2), etc..., interprètent les Hystricomorphes néotropicaux comme un autre cas de parallélisme, indépendant des formes africaines et aussi des Théridomyidés de l'Eocène-Oligocène européen ; Wood fait dériver le groupe sud-américain des Paramyinés, c'est-à-dire de Rongeurs non-hystricomorphes, à large répartition holarctique. Mais, tout récemment, le spécialiste Schaub (3) s'est opposé résolument à la possibilité d'une telle dérivation.

Nos informations actuelles n'imposent donc aucune solution satisfaisante. Il est possible que l'Amérique Centrale, dont les faunes anté-miocènes sont inconnues, fournisse un jour la clé du problème, les souches recherchées étant vraisemblablement des animaux tropicaux. Il n'en reste pas moins que la question posée est grosse de signification : s'il peut être prouvé que, à deux reprises, les Lémuriformes ont engendré des Singes, la position de certains théoriciens de l'Evolution deviendra difficilement défendable.

---

(1) Wood (A. E.), 1950. — Porcupines, Paleoraphy, and Parallelism. *Evolution*, 4, p. 87-98.

(2) Lavocat (R.), 1951. — Le parallélisme chez les Rongeurs et la classification des Porcs-Epics. *Mammalia*, t. 15, n°s 1-2, p. 32-38.

(3) Schaub (S.), 1953. — Remarks on the Distribution and Classification of the « Hystricomorpha ». *Verh. Naturf. Ges. Basel*, t. 64, n° 2, p. 389-400.

Quoi qu'il en soit, un fait reste acquis. A l'Oligocène, l'Amérique du Sud était géographiquement isolée ; aucune connexion continentale ne la reliait ni à l'Afrique, ni à l'Amérique du Nord ; et les apports qu'elle a reçus pendant cette période ont dû lui arriver par des transports passifs.

Connexions supposées avec les Grandes Antilles

Des Mammifères de type sud-américain figurent dans la faune pléistocène et actuelle de Cuba, Haïti et Porto-Rico ; ce qui a conduit divers auteurs à supposer une ancienne liaison de ces îles entre elles et avec le continent austral.

Cependant, comme l'a montré Matthew dès 1915 et 1919 (1), la faune des Grandes Antilles, pauvre et non équilibrée, parle au contraire en faveur d'une longue insularité. Ses éléments constitutifs sont d'origines diverses, et il est peu probable que leurs arrivées aient été simultanées. C'est ainsi que les Insectivores s'apparentent avec des formes oligocènes de l'Amérique du Nord ; les Gravigrades rappellent certains fossiles du Miocène argentin ; enfin les Rongeurs hystricomorphes, et aussi quelques Singes fossiles, paraissent correspondre à plusieurs apports échelonnés depuis le Pliocène jusqu'à une date récente. Il semble donc qu'ici encore, des transports passifs soient responsables de ces migrations ; si des connexions continentales étaient intervenues, elles auraient provoqué des échanges beaucoup plus amples et auraient abouti à une faune plus équilibrée.

Connexions avec l'Amérique du Nord

Il est indéniable qu'une grande partie — sinon la totalité — des Mammifères néotropicaux dérivent de formes originaires d'Amérique du Nord. Les relations entre les deux blocs continentaux, en ce qui concerne les échanges fauniques, comportent quatre phases successives :

1° Une liaison continentale existait certainement entre les deux Amériques au Crétacé supérieur et au début du Paléocène. Elle a été utilisée par les Marsupiaux (dans l'un ou l'autre sens, suivant

(1) Matthew (W. D.), 1915. — Climate and Evolution. *Ann. New York Acad. Sc.*, vol. 24, p. 171-318.

1919. — Recent discoveries of fossil Vertebrates in the West Indies and their bearing on the origin of the Antillean Faunas. *Proc. Amer. Phil. Soc.*, vol. 58, p. 161-181.

que l'on suppose une origine holarctique ou antarctique du groupe). Des Placentaires l'ont également franchie, du Nord au Sud. En effet, il existe de bonnes raisons pour supposer que les Edentés dérivent d'une souche paléanodonte nordique, encore inconnue, mais dont quelques descendants spécialisés ont laissé des vestiges fossiles dans le Tertiaire ancien de l'Amérique du Nord. En ce qui concerne les Ongulés, le problème est plus complexe, puisque six ordres distincts figurent dans le fonds initial sud-américain ; parmi ceux-ci, les Condylarthres sont certainement d'origine holarctique ; les Litopternes, exclusivement néotropicaux, en dérivent probablement ; les Notongulés, extraordinairement diversifiés au Sud, ont laissé quelques restes sporadiques dans le Paléocène supérieur de Mongolie et dans l'Eocène inférieur d'Amérique du Nord (il reste donc possible qu'ils aient d'abord apparu dans la Néogée) ; enfin les Astrapothériens, Xénongulés et Pyrothériens sont apparemment des branches parallèles aux Pénongulés boréaux (Pantodontes et Dinocérates).

Il faut remarquer que ce stock initial n'est connu en Amérique du Sud qu'à partir du Paléocène supérieur, par suite de l'absence de gisements fossilifères plus anciens. Dès cette date, la faune néotropicale était nettement différenciée : sur 12 familles qui la composent, 11 lui sont propres ; une seule est commune avec l'Amérique du Nord ; encore s'agit-il d'une famille d'une extraordinaire longévité, celle des Didelphidés, qui a persisté depuis le Crétacé supérieur jusqu'à nos jours.

On doit donc admettre que la connexion entre les deux Amériques était déjà rompue au début du Paléocène supérieur. De sorte que l'isolement de l'Amérique du Sud a vraisemblablement commencé au Paléocène moyen, peut-être même à la fin du Paléocène inférieur.

2° Nous avons déjà dit que, même si les immigrants oligocènes, Rongeurs et Singes, sont d'origine nord- ou centre-américaine, cela n'implique nullement l'existence d'un pont continental. Ces animaux paraissent avoir franchi une barrière océanique, peut-être jalonnée à ce moment par des îles-relais.

3° Au Miocène supérieur, arrivent les Procyonidés (Coatis), dont l'origine est certainement nord-américaine. Il s'agit encore d'un groupe à tendances arboricoles marquées, arrivé isolément, qui a dû bénéficier d'un transport passif pour atteindre le continent austral encore séparé.

4° En fin au Chapadmalalien apparaissent, non plus des éléments isolés, mais toute une vague d'immigrants nordiques, compre-

nant des Cricétidés, Ursidés, Mustélidés, Félidés, Chevaux, Pécaris et Cervidés, auxquels viendront s'ajouter au Pampéen des Léporidés, Canidés, Mastodontes, Tapirs, Camélidés, et finalement des Ecureuils.

Durant la même période, des groupes sud-américains gagnent l'Amérique du Nord : ce sont notamment des Gravigrades, Tatous, Glyptodontes, Capybaras et Porcs-épics arboricoles. D'autres, limités par leurs exigences climatiques, s'installent dans les forêts tropicales de l'Amérique centrale.

Une voie de migration s'est donc ouverte entre les deux Amériques à la fin du Tertiaire, et elle a été amplement utilisée depuis le Pliocène supérieur jusqu'à nos jours. Plus exactement, il s'agit d'une connexion continentale, fonctionnant comme un filtre assez lâche, qui a laissé passer de nombreux groupes dans les deux sens, tandis qu'il constituait pour d'autres un obstacle infranchissable.

Localisation de la barrière tertiaire entre les deux Amériques

D'après ce qui précède, les seules liaisons continentales imposées par l'étude des Mammifères sud-américains concernent l'Amérique du Nord. Elles comprennent une communication antérieure au Paléocène supérieur, suivie par un long isolement qu'on peut estimer au moins à 60 millions d'années, et enfin un rétablissement de la connexion continentale, réalisé au Pliocène supérieur.

Il peut être intéressant de chercher à localiser géographiquement la barrière qui, durant la plus grande partie du Tertiaire, s'est opposée aux échanges fauniques.

Les recherches réalisées en vue de prospections pétrolières nous ont apporté récemment des documents précis sur la géologie sud-américaine ; et la chance a voulu que certaines de ces recherches concernent la région critique constituée par la Colombie nord-occidentale. Au point de vue qui nous intéresse ici, un exposé récent de Nygren (1) a dégagé le rôle capital joué par une zone d'effondrement, qui a reçu le nom de géosynclinal de Bolivar (fig. 2). Il s'agit d'une aire basse, qui s'étend actuellement depuis le Golfe de Guayaquil au Sud jusqu'au Golfe d'Uraba au Nord, et qui est draînée par les rios Daule (Equateur), San Juan et Atrato (Colombie). Cette zone a fonctionné pendant le Tertiaire comme un géosynclinal, ou plus exactement comme un chapelet de fosses de subsi-

(1) Nygren (W. E.), 1950. — Bolivar geosyncline of Northwestern South America. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, vol. 34, n° 10. p. 1998-2006.

dence, séparées par des hauts-fonds, peut-être temporairement émergés. Il s'y est déposé quelque 6.000 à 10.000 m. de sédiments tertiaires, sous la charge desquels le fond s'est progressivement affaissé. Ces bassins ont parfois formé un bras de mer continu, comme l'indique l'uniformité des dépôts tout au long du couloir, comme le révèle surtout le mélange de faunes caraïbes et pacifiques (plus précisément ce sont les Foraminifères qui ont retenu jusqu'ici l'attention des spécialistes, tandis que les mégafossiles n'ont été encore que très peu étudiés).

FIG. 2. — Le géosynclinal de Bolivar.
(Légèrement modifié, d'après NYGREN.)

Ce géosynclinal est la conséquence d'une intense activité orogénique qui, accompagnée d'énormes épanchements ignés, s'est manifestée à la fin du Crétacé et au début du Tertiaire. Il en est résulté la surrection d'une Cordillère andine, et aussi celle d'un *borderland* occidental, formé d'une bande de terres basses émergées, allongée au long des côtes actuelles de l'Equateur et de la Colombie. A par-

tir de l'Eocène moyen, la mer pénètre dans la dépression ainsi délimitée ; l'invasion commence par le Sud, avec des faciès transgressifs, bordés par des récifs d'algues calcaires (*Archaeolithothamnium*) ; un bras de mer continu est constitué à l'Eocène supérieur. L'histoire suivante est marquée par des interruptions, des discordances, qui traduisent des mouvements orogéniques. L'extension marine atteint son maximum à l'Oligocène supérieur, et les eaux gagnent alors à l'Est ce qui est aujourd'hui la vallée du Cauca. Un nouveau paroxysme orogénique, au Miocène, surélève la Cordillère et provoque l'arrivée massive de dépôts détritiques dans le géosynclinal, dont l'axe est alors déplacé plus à l'Est. Le comblement et l'émersion semblent terminés au Miocène supérieur, à partir duquel on ne trouve plus que quelques golfes locaux.

En résumé, le géosynclinal de Bolivar a constitué un obstacle aux migrations intercontinentales depuis l'Eocène supérieur jusqu'au Miocène moyen, soit une période d'une trentaine de millions d'années. Encore faut-il remarquer que cet obstacle n'a peut-être pas toujours été continu, car les hauts-fonds ont pu se prêter à des communications terrestres temporaires.

Nous voyons donc que la barrière ainsi définie, pour essentielle qu'elle soit, ne s'établit pas assez tôt et ne persiste pas suffisamment pour rendre compte des caractères relevés dans les faunes continentales.

Mais il convient de remarquer que l'histoire de la région située plus au NW (Panama, Costa Rica) n'est pas complètement connue, et qu'il a pu s'y constituer d'autres barrières océaniques. Un autre point obscur concerne la date et les modalités de la destruction du *borderland* occidental, en grande partie effondré aujourd'hui.

De plus, des obstacles d'autre nature ont pu s'opposer aux échanges fauniques. Des filtres sévères peuvent être constitués par une montagne, une forêt tropicale ou un désert. Or une modification des courants océaniques peut influencer fortement les climats locaux. On sait, par exemple, qu'actuellement le courant froid de Humboldt est responsable du climat désertique qui règne sur la bande côtière du Pérou ; à partir de l'Equateur central, ce courant s'infléchit vers l'Ouest ; plus au Nord, les côtes colombiennes et nord-équatoriennes, longées par un courant chaud (Corriente del Niño), sont humides et couvertes d'une forêt tropicale. Or il est possible que le courant de Humboldt se soit autrefois étendu davantage vers le Nord. C'est ce que semble révéler l'existence de faciès à radiolaires, situés à l'Ouest des formations tertiaires de la région d'Esmeraldas, et qui, d'après Thalmann et Stainforth, indiqueraient la présence d'un courant froid. Nygren propose d'ailleurs

une explication : le relevé des fonds marins met en évidence une chaîne submergée qui s'étend vers le SE à partir du Panama occidental ; une telle chaîne, lorsqu'elle était émergée, a pu dévier plus à l'Ouest le courant chaud et contraindre le courant froid à remonter le long des côtes, davantage vers le Nord.

Comme on le voit, un fait capital demeure, le géosynclinal de Bolivar. Tout le reste comporte une grande part d'hypothèses. Il semble cependant que diverses barrières ont dû interférer d'une façon complexe pour provoquer un isolement presque absolu de l'Amérique du Sud pendant la plus grande partie du Tertiaire.

EVOLUTION DE LA FAUNE MAMMALIENNE SUD-AMÉRICAINE

Depuis le Paléocène jusqu'à nos jours, la faune mammalienne sud-américaine a subi de profondes modifications dont l'analyse qualitative et statistique (1) est riche d'enseignements.

Le graphique de la fig. 3 met en évidence les principaux changements survenus dans la composition faunique. Il est établi en considérant globalement les faunes de chaque époque géologique et,

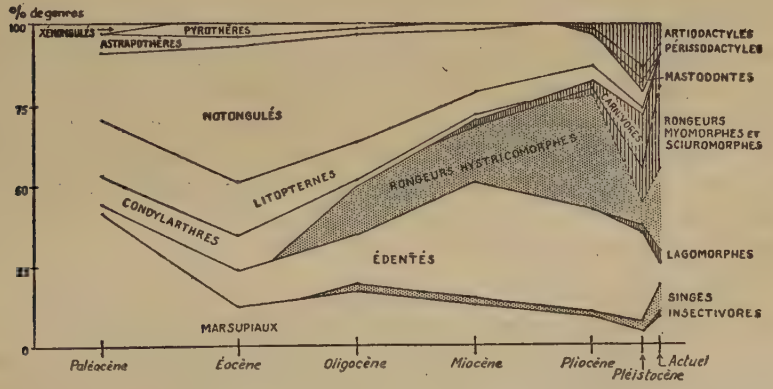


Fig. 3. — Compositions successives des faunes de Mammifères terrestres en Amérique du Sud. En blanc, fonds initial ; en pointillé, immigrants oligocènes ; en hachures, immigrants tardifs.
(En partie, d'après Simpson.)

dans celles-ci, les ordres de Mammifères qui y sont représentés ; l'importance relative des ordres constituants est estimée d'après le pourcentage des genres connus. Il n'est pas besoin de souligner

(1) Simpson (G. G.), 1950. — History of the Fauna of Latin America. *Amer. Scientist.*, vol. 38, p. 361-289.

le caractère arbitraire des éléments d'appréciation ; un autre choix conduirait à des graphiques d'aspect sensiblement différent.

Du point de vue chronologique, on pourrait espérer une représentation meilleure en faisant intervenir des tranches de temps plus étroites. Mais les faunes de certains niveaux sont trop pauvrement connues ; leur considération mettrait en évidence des perturbations apparentes, qui fausseraient l'allure générale de l'évolution faunique.

En ce qui concerne la composition de chaque faune, l'importance relative des ordres constituants serait autre si on l'appréciait d'après le nombre des espèces, ou le nombre des individus, ou encore d'après le produit du nombre des individus par le poids moyen de chaque catégorie (masse de matière vivante).

Il faut souligner aussi le caractère très incomplet de nos informations actuelles sur les faunes fossiles. Il est notoire, par exemple, qu'un milieu tel que la forêt tropicale, bien que richement peuplé, n'est pas favorable à la fossilisation et n'intervient pratiquement pas dans les archives paléontologiques. Cette lacune retentit gravement sur l'estimation globale de la faune. Pour certains niveaux, la composition considérée ne correspond nullement à la totalité du continent sud-américain ; il arrive même qu'elle ne concerne qu'une faune marginale, celle de la Patagonie. De sorte que la découverte d'un gisement intertropical de même âge peut modifier grandement la composition faunique admise antérieurement : une telle correction est intervenue en ce qui concerne la faune paléocène, d'abord connue seulement au Rio Chico, et récemment enrichie par la découverte du gisement brésilien d'Itaborai.

Quoi qu'il en soit, le tableau considéré a une valeur indicative qui n'est pas négligeable. On y voit que l'histoire des faunes néotropicales présente d'abord, pendant la longue période d'isolement, une phase d'évolution continue, à partir du stock initial ; quelques groupes, arrivés par transport passif à l'Oligocène, s'ajoutent au fonds indigène sans apporter de grave perturbation dans l'allure générale de l'évolution. Au contraire, deux événements majeurs interviennent ensuite, qui affectent profondément la composition faunique ; le premier se situe au Pliocène et correspond à l'arrivée massive d'éléments nordiques ; le second, qui coïncide avec le début de l'Holocène, apparaît comme une sorte de crise, entraînant de nombreuses extinctions et affectant électivement les grands animaux, quelle que soit leur origine.

Nous aurons donc à considérer trois phases successives.

1. — Période d'isolement

Grâce à leur isolement, prolongé jusqu'au Pliocène moyen, les Mammifères sud-américains ont réalisé un équilibre faunique fortement original, à partir des trois groupes initiaux (1), auxquels se sont ajoutés les immigrants oligo-miocènes.

La radiation présentée par chaque groupe a été d'autant plus ample que celui-ci était plus anciennement installé. Dans l'ensemble, pour un groupe donné, cette radiation commence toujours par une phase explosive, aboutissant à un fouillis de formes peu distinctes les unes des autres ; une phase de spécialisation lui succède, d'où se dégagent des types bien caractérisés, orientés chacun vers un mode de vie particulier.

Les types réalisés dans la Néogée sont si nombreux qu'une description, même sommaire, entraînerait de longs développements ; on eu trouvera une excellente présentation dans Scott (1937) (2).

Ces types montrent souvent, avec les formes des autres continents, des convergences et des parallélismes remarquables. Les ressemblances observées peuvent être très poussées (Borhyænidés et Dasyuridés, Protérothéridés et Equidés, Fourmiliers et Pangolins), ou porter seulement sur l'allure générale (Macrauchénidés et Camélidés, Trigodon et Rhinocéros) ou sur un organe particulier (canines et expansion mentonnière de *Thylacosmilus* et de *Smilodon*, molaires des Notohippidés et des Chevaux, molaires de *Pyrotherium* et de *Dinotherium*). Ces similitudes observées dans des branches distinctes peuvent être attribuées au rôle modeleur du mode de vie. Plus exactement elles traduisent le fait qu'un groupe animal donné ne dispose que d'un nombre limité de solutions pour résoudre un problème d'adaptation écologique (Lavocat).

Les dispositifs semblables réalisés au Nord et au Sud ne sont pas forcément synchroniques. Et, dans quelques cas, il est remarquable d'observer leur apparition plus précoce chez des formes sud-américaines, qu'il est donc abusif de qualifier de « moins progressives ». C'est ainsi que les Notohippidés de l'Oligocène inférieur sont munis de dents prismatiques, à replis d'émail et à revêtement de cément, que l'on ne connaît chez les Chevaux qu'à partir du Miocène supérieur. De même, la patte monodactyle du Protérothéridé *Thoatherium* dépasse, dès le Miocène inférieur, le stade actuellement atteint par les Chevaux.

---

(1) Sur la composition du fonds initial, voir notamment : Simpson (G. G.), 1948, The Beginning of the Age Mammals in South America, Part I. *Bull. Amer. Mus. Nat. Hist.*, vol. 91, p. 1-232 ; Paula Couto (C. de), 1952, *op. cit.*

(2) Scott (W. B.), 1937. — A History of Land Mammals in the Western Hemisphere. (Rev. Ed.), New-York, Mac Millan.

Cependant, les Mammifères sud-américains ont réalisé des modèles tout à fait originaux, qui n'ont pas d'équivalent dans les autres faunes connues. Et il est intéressant d'observer que les formes les plus insolites apparaissent dans des groupes précocement éteints dans l'hémisphère Nord, notamment les Edentés et les Notongulés. Grâce à leur survivance dans la région néotropicale, ces groupes ont pu réaliser certaines de leurs potentialités évolutives, qu'il aurait été impossible de soupçonner sans les données de cette expérience naturelle.

Il convient de souligner ici le rôle protecteur de l'isolement, qui a permis la survie de groupes archaïques, précocement éteints, dans l'Hémisphère Nord. D'autre part, à l'intérieur du domaine isolé, il semble que la zone intertropicale ait constitué un milieu éminemment conservateur : c'est ainsi que certains rameaux (Didolodontidés, Henricosbornidés), qui ne dépassent pas l'Eocène en Patagonie, ont été retrouvés par Stirton dans une faune miocène de Colombie.

Dès leur installation, les groupes du fonds initial se partagent les principaux rôles écologiques. Les Marsupiaux conquièrent d'emblée le monopole du régime carnivore, tandis que les Placentaires s'assurent l'exclusivité des types herbivores. Au contraire les régimes omnivores et insectivores sont répartis entre les deux sous-classes.

Les Marsupiaux se subdivisent précocement en trois branches durables : les Didelphidés omnivores, les Cœnolestidés insectivores et les Borhyænidés carnivores. Mais en outre, quelques rameaux mineurs peuvent être interprétés comme des essais infructueux vers d'autres rôles écologiques : ce sont, par exemple, les Polydolopidés qui miment les Multituberculés, les Caroloameghinidés probablement frugivores, et les Grœberidés (Patterson, 1952) dont les incisives rappellent celles des Rongeurs et des Tillodontes.

Les Ongulés, tous herbivores, acquièrent une extraordinaire diversité.

On y distingue d'abord un ensemble qui se parallélise au mieux avec des groupes holarctiques. Les Condylarthres sud-américains, proches parents de ceux du Tertiaire ancien nordique, constituent cependant une famille spéciale (Didolodontidés) ; largement répandus au Paléocène et à l'Eocène, ils ont réussi à se maintenir en Colombie jusque dans le Miocène (Stirton). Les Litopternes, qui s'en sont détachés précocement, ont connu un succès plus durable ; ils comprennent une famille (Protérothéridés) remarquablement parallèle à celle des Chevaux, et une autre (Macrauchénidés) qui allie

une allure générale quelque peu caméliforme avec des dents analogues à celles de Paléothéridés d'Europe.

Les Notongulés sont beaucoup plus variés et plus aberrants. Ils n'ont connu au Nord qu'une existence obscure et éphémère ; au contraire, la Néogée leur a offert un refuge où ils ont pu se diversifier à l'extrême. Parmi leurs types les plus marquants, des formes lourdes, telles que les Toxodontes, évoquent les Rhinocéros ou les Hippopotames. D'autres, comme les Homalodothères, ont une allure très singulière, mais leurs membres antérieurs allongés et munis de griffes fouisseuses ne sont pas sans rappeler ceux des Chalicothères déterreurs de racines du Tertiaire holarctique. Enfin, divers rameaux acquièrent un faciès de Castors ou de Lièvres, inattendu chez des Ongulés ; cependant, les Hyracoïdes africains offrent un exemple parallèle.

Les trois autres ordres, Xénongulés, Pyrothériens et Astrapothériens comprennent des animaux pesants, souvent munis d'une trompe et généralement armés de défenses. Ils occupent dans le monde ancien de l'Amérique du Sud un rôle analogue à celui des Proboscidiens actuels.

Les vrais Edentés (1) constituent un autre exemple d'un groupe qui, rapidement éliminé dans l'hémisphère Nord, a pu réaliser en Amérique du Sud de nombreux types originaux.

La branche axiale est constituée par les Tatous, protégés par une carapace articulée. La plupart ont un régime alimentaire peu exclusif, et se nourrissent indifféremment de petits animaux invertébrés ou de viande putréfiée. Mais certains se sont adaptés à un régime plus strict, constitué uniquement d'insectes, ou de végétaux ; on prête même des mœurs carnivores — tout au moins nécrophages — à certains Tatous éteints (Peltéphilidés), armés de dents tranchantes.

Les Fourmiliers, connus depuis le Miocène inférieur, sont certainement plus anciens. Il se nourrissent exclusivement de fourmis ou de termites. Certains sont arboricoles.

Enfin, d'autres groupes d'Edentés se sont délibérément orientés vers le régime herbivore : ce sont d'une part les Glyptodontes, à cuirasse rigide, d'autre part les Gravigrades et leurs proches parents, les Paresseux arboricoles.

Il est surprenant que, malgré la dégénérescence dentaire qui les a affectés dès l'origine, les Edentés aient réussi à s'adapter à des modes de vie aussi divers. L'absence d'émail ne les a pas em-

(1) Hoffstetter (R.), 1954. — Phylogénie des Edentés Xénarthres. *Bull. Mus. Nat. Hist. Nat.* (2), t. 26, n° 3, p. 433-438.

pêchés de réaliser, par des solutions originales, une molaire capable de broyer des végétaux. Il n'est peut-être pas d'exemple plus singulier, parmi tous les cas connus de spécialisation dentaire, que celui d'une molaire de Glyptodonte, au fût élevé, trilobé, où un relief complexe d'ostéodentine remplace fonctionnellement les replis d'émail des Ongulés. Tout aussi remarquable est la dent prismatique d'un *Megatherium*, avec ses deux crêtes transversales de dentine dure, son noyau central de vasodentine tendre, et son épais revêtement de cément.

St l'on rappelle ici la tentative des Tatous vers le régime carnivore, avec les Peltéphilidés, on est conduit à reconnaître chez les Edentés des potentialités adaptatives tout à fait inattendues chez un groupe aussi aberrant. On est même en droit de supposer que, s'ils avaient eu la chance d'être isolés sur un continent, les Edentés auraient sans doute été capables d'y effectuer une radiation adaptative complète.

A partir de l'Oligocène, quelques « sauteurs d'îles » viennent enrichir la faune locale. Il ne s'agit plus cette fois de groupes généralisés, mais de formes déjà engagées dans une voie déterminée ; d'autre part, un grand nombre de niches écologiques étaient déjà occupées au moment de leur arrivée. Il en est résulté que leur radiation a été limitée, et qu'en particulier leur régime alimentaire est resté uniforme. Il est cependant significatif d'observer que leur différenciation est d'autant plus grande que leur date d'installation est plus ancienne. Ainsi les Rongeurs néotropicaux, apparus à l'Oligocène inférieur, forment un ensemble qui a la valeur d'un infra-ordre (*Nototrogomorpha* de Schaub) ; les Singes platyrrhiniens, qui remontent à l'Oligocène supérieur, constituent une superfamille (*Ceboidea* de Simpson) ; enfin les Procyonidés, introduits au Miocène supérieur, forment une simple famille.

2. — Mélange des Faunes Nord- et Sud-Américaines

A partir du Pliocène supérieur se produit, entre les deux faunes du Nord et du Sud, un échange *bilatéral* et *multiple*. Ce double caractère démontre qu'il ne s'agit plus, cette fois, de transports passifs, mais qu'une connexion continentale a permis un passage relativement aisé dans les deux sens.

Au total, 14 familles d'origine holarctique (auxquelles il faut ajouter les Procyonidés qui les ont précédées) envahissent le continent sud-américain, tandis que 7 familles néotropicales s'étendent largement en Amérique du Nord. L'échange apparaît rapide, puisque, dès le Chapadmalalien, 8 familles nordiques sont installées sur

le territoire argentin. Il n'est cependant pas instantané, mais comporte une succession de vagues de migration, qui se prolongent jusqu'à nos jours : c'est ainsi que s'est produite récemment une timide pénétration vers le Sud de l'Insectivore *Cryptotis*, du Canidé *Urocyon*, etc..., tandis que le Tatou commun (*Dasypus novemcinctus*) gagne peu à peu du terrain vers le Nord.

Cette arrivée massive d'immigrants en Amérique du Sud a pour conséquence une sorte de « sursaturation » faunique. Il en résulte une rupture (par excès) de l'équilibre local, caractérisée par la coexistence de formes homologues qui prétendent occuper le même rôle écologique. La concurrence est d'autant plus sévère que le mode de vie est plus semblable. Lorsqu'il y a une véritable duplication, celle-ci entraîne fatalement la disparition de l'un des deux compétiteurs ; et l'expérience montre que c'est généralement le type indigène qui est éliminé par l'immigrant.

Dans une généralisation hâtive, on a voulu voir là l'explication unique des nombreuses extinctions qui ont frappé la faune néotropicale depuis le Pliocène supérieur jusqu'à nos jours. Une telle position est assurément abusive ; nous verrons que certaines formes locales, après avoir survécu à l'invasion d'origine nordique, ont ensuite été durement éprouvées, à la fin du Pléistocène, sans qu'on puisse attribuer leur élimination à la concurrence de la faune holarctique.

Il n'en reste pas moins que certains éléments locaux, jusque-là florissants, ont dû s'effacer devant des immigrants plus favorisés. C'est le cas des Marsupiaux Borhyænoïdes, c'est aussi celui des Litopternes Protérothéridés ; les deux groupes sont respectivement remplacés par les Carnivores placentaires et par les Chevaux, et cette substitution est achevée avant la fin du Pliocène.

Il est non moins certain que d'autres groupes, contraints de concéder une place aux nouveaux arrivants, souffrent d'une diminution de leur espace vital, d'où une réduction de leur nombre et de leur variété : une telle régression s'observe chez les Rongeurs hystricomorphes et plus encore chez les Ongulés indigènes.

Cependant, de nombreux types néotropicaux trouvent une protection dans leur originalité. Leur mode de vie — et par conséquent leur rôle écologique — ne se superpose exactement à celui d'aucun des immigrants. La concurrence est alors moins directe. Non seulement ces types locaux réussissent à survivre, mais certains ont même pu pénétrer plus ou moins profondément dans le domaine nordique.

Ainsi des Edentés (Tatous, Glyptodontes, Gravigrades) et divers Rongeurs (Capybaras, Porcs-Epics arboricoles) ont occupé

au Pléistocène une aire étendue sur le territoire nord-américain. Ils se sont si bien indigénisés dans leur nouveau domaine qu'ils y ont présenté des différenciations marquées.

D'autres animaux, tels que les Paresseux, les Fourmiliers, les Singes, de nombreux Rongeurs et Marsupiaux, ont vu leur poussée vers le Nord limitée par leurs exigences écologiques. Ce sont dans l'ensemble des hôtes de la forêt tropicale, et ils n'ont pu s'étendre au delà des frontières de celle-ci.

D'autres enfin, tels que les Litopternes (*Macrauchenia*) et Notongulés (*Toxodon*, *Mesotherium*, *Paedotherium*), et aussi divers membres des groupes précédents, se sont maintenus dans leur domaine austral, sans réussir à franchir le passage intercontinental. On pourrait croire qu'ils ont été bloqués au Sud par la pression de la faune nordique. L'explication est probablement autre. Il est certain, en effet, que les migrations d'un hémisphère à l'autre sont gênées par la zonation climatique, et que la connexion panaméenne a joué (et joue encore) le rôle d'un filtre, qui permet certains passages, mais en interdit d'autres. On constate d'ailleurs que, de la même façon, des éléments nordiques, comme les Bovidés et les Antilocapridés, se sont révélés incapables de forcer le passage, sans qu'on ait jamais songé à expliquer leur blocage par une pression des faunes australes.

Au Pléistocène, la faune néotropicale se trouve donc profondément modifiée par ces additions et ces extinctions, et forme un contraste marqué avec celle du Pliocène inférieur ou moyen.

Un nouvel équilibre s'est réalisé, dans lequel interviennent pour la moitié des genres connus, les nouveaux arrivés ; l'autre moitié est constituée par les descendants des groupes initiaux et par ceux des immigrants oligocènes.

Il s'agit d'un riche ensemble, qui correspond aux faunes classiques du Pampéen d'Argentine, à celles des cavernes du Brésil, dont la haute originalité a été dégagée il y a plus d'un siècle par les travaux d'Owen et de Lund.

Dans ce curieux assemblage, les Carnivores sont tous d'origine nordique, et comptent parmi eux des animaux imposants. Les grands herbivores sont extraordinairement variés puisqu'ils comprennent des Artiodactyles (Cervidés, Camélidés), des Périssodactyles (Chevaux, Tapirs), des Mastodontes, des Litopternes (*Macrauchenia*), des Notongulés (*Toxodon*, *Mesotherium*) et des Edentés (Gravigrades, Glyptodontes et même quelques Tatous). Les Rongeurs sont à peu près en parties égales constitués par des éléments anciens et récents. Des Marsupiaux et des Edentés jouent le rôle d'insectivores. Enfin divers omnivores (Sarigues, Singes, Pécaris) complètent cet ensemble.

3. — La crise de la fin du Pléistocène

Un nouveau changement radical intervient à la fin du Pléistocène qui se traduit dans la fig. 3 par un rebroussement caractéristiques des diverses courbes.

Cette date est en effet marquée par l'extinction soudaine d'un grand nombre de formes, et spécialement des types géants.

Parmi les Mammifères autochtones, les plus touchés sont les Gravigrades, les Glyptodontes, les Litopternes et les Notongulés, qui s'éteignent définitivement. Les Tatous et les Rongeurs, moins éprouvés, perdent cependant leurs représentants les plus puissants. Les immigrants sont également affectés : les Mastodontes et les Chevaux disparaissent, et aussi les plus grands des Lamas (*Palæolama*), des Cervidés et des Carnivores (*Smilodon*, grands Jaguars, *Arctotherium*, *Protocyon*, grands Chiens).

L'extinction apparaît massive et rapide. En fait, on a cité à plusieurs reprises le cas de survivances de Mastodontes, de Chevaux, de Mylodontes, de Toxodontes, etc... L'exemple le plus fameux est celui du Mylodonte de la caverne de Ultima Esperanza, près du détroit de Magellan ; on a retrouvé non seulement les ossements de l'animal, mais aussi sa peau garnie de poils et son fumier. Cependant, une étude du carbone radioactif a montré que ces restes, malgré leur fraîcheur apparente, remontent à quelque 9.000 ans.

Il semble bien (1) que les grandes formes pléistocènes n'ont guère dépassé cette date limite, qui correspond à la fin de la dernière glaciation andine, et qui, localement, coïncide avec l'arrivée de l'Homme.

On a parfois tenté d'interpréter ces extinctions comme une dernière conséquence du mélange des faunes holarctiques et néotropicales. Une telle explication est contredite par le fait que le phénomène a affecté — et au même moment — aussi bien les immigrants que les autochtones, et que, parmi les premiers, les Carnivores les mieux armés n'ont pas été épargnés.

D'autre part, il convient de rappeler que la fin du Pléistocène apparaît comme une date fatidique pour les grands Mammifères terrestres, non seulement en Amérique du Sud, mais aussi sur la presque totalité du Globe. C'est à cette date que disparaissent les formes les plus spectaculaires d'Amérique du Nord, d'Europe,

(1) Hoffstetter (R.), 1952. — La antigüedad del Hombre americano. *Bol. Inf. Cient. Nac. Quito*, vol. 4, n° 47, p. 794-816.

d'Asie, et — dans une moindre mesure — d'Afrique. L'Australie elle-même n'échappe pas à la règle, malgré son isolement. Il s'agit donc d'un phénomène mondial, qui relève probablement d'une explication unique.

Cependant, aucune des nombreuses hypothèses avancées jusqu'à présent ne s'est révélée pleinement satisfaisante.

Dans l'état actuel de nos connaissances, l'explication la plus plausible pourrait être une profonde perturbation climatique — probablement une grande sécheresse — intervenue au moment du dernier retrait glaciaire. Il en serait résulté une période d'aridité entraînant l'extinction des grands herbivores, particulièrement exigeants pour leur alimentation, aussi bien en qualité qu'en quantité. Enfin, certains grands carnivores n'auraient pu survivre à la disparition de leurs proies habituelles.

La faune sud-américaine est sortie de cette épreuve très appauvrie, totalement privée de formes géantes. La crise a été ici particulièrement sévère, beaucoup plus qu'en Afrique, par exemple ; et il en résulte un contraste marqué entre la composition faunique du Pléistocène et celle de l'Holocène. Cependant, la faune moderne n'en est pas moins équilibrée, mais ses caractéristiques sont toutes différentes de celles du passé.

En ce qui concerne le pourcentage des genres, les immigrants holarctiques n'ont marqué aucun progrès, puisqu'ils continuent à représenter la moitié du total. Mais, dans l'autre moitié, les proportions sont grandement modifiées. Les anciens autochtones ont été particulièrement éprouvés, non pas qu'ils aient souffert, comme on l'a dit, de quelque infériorité, mais simplement parce que certains de leurs groupes, composés uniquement de grands herbivores, n'ont pas franchi la période critique. Actuellement, l'ancien fonds n'est plus représenté que par des Marsupiaux (Sarigues et Cænolestes) et des Edentés (Tatous, Fourmiliers et Paresseux), tous de taille modeste. Les descendants de la seconde couche faunique, Singes et Rongeurs hystricomorphes, ont traversé la crise sans grand dommage, de même que les Rongeurs d'origine nordique. Les autres immigrants tardifs ont perdu leurs représentants les plus imposants ; ils se sont néanmoins assuré l'exclusivité de deux modes de vie fondamentaux : celui des Carnivores prédateurs et celui des Ongulés herbivores.

L'assemblage moderne ainsi constitué met en évidence un fait remarquable. Divers groupes holarctiques ont été complètement éliminés de leur berceau nordique, mais ont réussi à se maintenir dans leur refuge sud-américain. De sorte que ces animaux, qui ne sont pas de vrais autochtones (au moins en tant que groupes), sont

devenus endémiques dans la région néotropicale. Ce sont notamment les Lamas, Pécaris, Tapirs et Ours néotropicaux, Coatis, Kinkajous, Jaguars, etc... Il faut souligner que ces multiples exemples, clairement analysables, s'opposent au faux axiome trop souvent invoqué en Biogéographie, selon lequel le berceau d'un groupe devrait être recherché là où il présente actuellement ses représentants les plus nombreux et les plus variés.

Malgré la rude épreuve qu'elle a subie il y a quelque 10.000 ans, malgré l'absence de grandes formes, malgré aussi l'arrivée de l'Homme qui intervient toujours comme un élément perturbateur, la faune sud-américaine a reconquis aujourd'hui une richesse et une vitalité remarquable. Il faut même noter que certains de ses groupes présentent un foisonnement révélateur. C'est le cas des Rongeurs. C'est surtout celui des Marsupiaux Didelphidés, dont le buissonnement actuel est interprété par Simpson comme l'indication possible d'une future radiation en puissance.

R. Hoffstetter.

LES LIVRES

AUBERT DE LA RUE (E.), BOURLIÈRE (F.), HARROY (J. P.). — Tropiques. Un vol. in-4°, 206 pages, dont 80 d'héliogravures et 16 planches en couleurs. Paris, 1954, Horizons de France, édit. (Prix : 2.950 francs).

Ce nouvel ouvrage de la Collection « **La Nature vivante** » est une nouvelle réussite. Les noms des auteurs, universellement connus, expliquent comment le sujet a pu être aussi remarquablement traité, car si la mode est aux beaux albums d'images, elle n'est pas toujours aux textes parfaits. C'est qu'ici, les auteurs ne se sont pas contentés d'écrire des légendes, mais ils ont traité le sujet.

M. E. AUBERT DE LA RUE, géologue et le plus grand voyageur de sa génération, a visité et étudié personnellement une très grande partie du monde. Il nous présente le Milieu tropical, ses climats si divers, ses sols, ses latérites, puis son Paysage végétal infiniment varié : grande forêt dense tropicale, forêt secondaire, mangrove, savane, forêt sèche épineuse, végétation désertique. La plupart des illustrations sont des photographies de l'auteur.

Le Dr F. BOURLIÈRE présente la Vie animale sous les Tropiques, vie étrange par la forme, la splendeur des couleurs, la taille, la richesse en espèces. Nous jetons un coup d'œil sur les faunes forestières et celles des épiphytes, celle des troncs d'arbres vivants et celle du sous-bois, celle des arbres morts, celle des clairières et des savanes.

Dans la troisième partie, M. J. P. HARROY, l'éminent Secrétaire de l'Union Internationale pour la Protection de la Nature, montre le comportement de l'Homme dans le milieu tropical. Après avoir brossé un tableau rapide des ressources des Tropiques, il dénonce courageusement le mal provoqué par l'homme, et pose le problème de la dégradation des sols, de la protection des végétaux et des animaux.

L'illustration est d'une richesse incroyable et les planches en couleurs retiennent longtemps l'attention par leur beauté.

R. FURON.

G. BIDAULT DE L'ISLE, Membre correspondant du Bureau des Longitudes. — **« Vieux Dictons de nos Campagnes ».** — 2 vol. Nouvelles éditions de la Toison d'Or, à Paris.

Au cours des siècles, les habitants des campagnes, vivant dans la nature, ont observé le déroulement des saisons, les manifestations météorologiques, leur influence sur la faune, la flore et les travaux des champs.

Les observations se sont traduites par des dictons et par des traditions et usages variables suivant les provinces de France. M. Bidault de l'Isle a eu l'heureuse idée de réunir une importante documentation sur ce sujet et de la présenter en deux volumes, où la valeur scientifique des faits rapportés est discutée et où sont contées des anecdotes folkloriques d'un réel intérêt.

Il convient de féliciter l'auteur d'avoir présenté son ouvrage de si attrayante façon.

J. VERNE.

E. BOREL, R. DELTHEIL et R. HURON. — Probabilités, erreurs. — 3e édition entièrement refondue. Un vol. de 220 p., avec fig., de la Coll. A. Colin, Paris, 1954. Prix : 250 francs.

Tout en conservant à l'ouvrage son caractère élémentaire, la 3e édition à laquelle s'est adjoint M. Roger Huron, professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse, a été mise à jour en s'appuyant sur diverses notions désormais classiques : **variable aléatoire, loi de répartition, variance, écart type.**

C'est là une chose très heureuse si l'on songe à l'usage croissant du calcul des probabilités dans les Sciences expérimentales, à son rôle nécessaire en théorie des assurances, et au développement des services de statistique dans toutes les branches de la production.

Chose essentielle, pour les futurs praticiens : des tables numériques !

G. BOULIGAND.

G. BOULIGAND. — Mécanique rationnelle, Cours et problèmes résolus à l'usage des élèves des Facultés des Sciences. — Cinquième édition revue et très augmentée. Un vol. XXXII-572 p., Paris 1954, Vuibert, édit.

L'enseignement de la mécanique rationnelle pour être efficace doit mettre à la portée de l'étudiant un plan de travail détaillé, un exposé complet et précis des questions du programme, de nombreux problèmes résolus à titre d'exemples, des indications sur la portée et les extensions des théories mathématiques utilisées. Pour atteindre ce but, M. G. Bouligand a rassemblé sous le nouveau titre de Mécanique Rationnelle et en un seul volume, avec des remaniements et des addenda, le Précis de Mécanique rationnelle et les Compléments et exercices sur la mécanique des solides qu'il avait déjà publiés. Des indications préliminaires montrent à l'étudiant l'apport de la mécanique rationnelle dans le cadre général de la connaissance mathématique et l'instrument de culture et de méthodologie scientifique que son enseignement doit constituer. Des directions d'études précisent dès l'abord l'ordre dans lequel les connaissances doivent être acquises. M. Bouligand montre que, contrairement à l'opinion de certains professeurs, la mécanique rationnelle est une science vivante. Des références à de nombreux articles et travaux récents donnent de fréquentes indications sur l'orientation des recherches actuelles et les extensions susceptibles d'intéresser les étudiants au-delà de la simple préparation à un examen.

M. Bouligand a divisé son ouvrage en deux grandes parties, d'une part, la mécanique rationnelle et ses problèmes classiques, d'autre part, l'étude du frottement, des compléments et des exercices. La première expose successivement la théorie des vecteurs, la cinématique, la géométrie des masses, les principes et théorèmes généraux de la dynamique et leurs applications au corps solide, les éléments de la dynamique analytique, les cas usuels d'intégration, l'étude de la stabilité et des petits mouvements, le principe de moindre action et ses applications, la théorie des chocs et percussions, des problèmes types de dynamique sans intervention du frottement, des compléments de dynamique analytique, des notions sur la mécanique des fils, sur la mécanique des milieux déformables, des notions sur la mécanique des fluides et sur les théories de la mécanique relativiste.

La seconde partie comprend deux sections : A - cinématique, étude du mouvement d'un plan sur un plan et exercices sur le mouvement d'un solide ; B - dynamique : forces de liaison, frottement, choc avec frottement de glissement selon le point de vue de Darboux, théorie énergétique du choc avec frottement, étude des liaisons unilatérales, problèmes complémentaires et questions diverses.

G. PETIAU.

M. DERIBÉRÉ. — Les applications pratiques des rayons infrarouges. — Un volume relié toile de 436 pages, 316 figures, 3e éd., Dunod, Paris, 1954.

Cet ouvrage, dont les deux premières éditions ont été rapidement épuisées, fait ressortir l'importance de la technique des rayons infrarouges dont les applications dans les domaines les plus divers se sont multipliés.

Extrait de la table des matières :

Vues générales sur l'infrarouge ; Production de l'infrarouge : transet séparation des radiations ; réflexion des radiations infrarouges ; transmission et absorption ; la photographie infrarouge ; le séchage par rayonnement infrarouge et ses applications ; traitements thermiques et cuissons ; cellules photoélectriques ; le télescope électronique ; relations entre l'infrarouge et la luminescence ; applications biologiques, physiologiques et thérapeutiques des radiations.

M. PARODI.

ROUCH (J.). — Les mers polaires. — Un vol. in-8 jésus, 253 pages (Bibliothèque de Philosophie scientifique), Paris (Flammarion), 1954. Prix : 550 fr.

Le Capitaine de vaisseau Jules Rouch, Directeur du Musée océanographique de Monaco, nous apporte un nouveau livre sur la Mer. Les mers polaires sont maintenant d'actualité, on en parle beaucoup et nous trouvons ici une documentation solide. Regrettons toutefois, qu'un ouvrage de Géographie pure, traitant de régions peu connues, ne contienne aucune carte, ce qui nécessite le recours à un Atlas pour pouvoir suivre le texte.

Ce texte, excellent, est une suite de petites monographies sur la baie d'Hudson, les chenaux de l'archipel nord-américain, la mer du Labrador, la mer de Baffin, la mer du Groenland, celle de Barentz, la mer Blanche et la mer de Kara, les mers du plateau continental sibérien ,la mer de Bering et l'Océan arctique, puis l'Océan antarctique. Pour chaque chapitre, l'auteur nous donne des définitions, le climat, la température et la salinité, les courants, les marées, les glaces, les possibilités de navigation.

Le dernier chapitre, fort original, traite du rôle des régions polaires dans la littérature française, et, entre autres belles choses, le Commandant Rouch nous donne la clef des navigations de Pantagruel. Dans son Quart Livre, Rabelais a utilisé les renseignements rapportés par Jacques Cartier parti à la recherche du Passage Nord-Ouest.

R. FURON.

TERMIER (H. et G.). — Formation des continents et progression de la vie. — Un vol., in-8°, 135 pages, 20 planches hors-texte, 5 cartes, 1 tableau. Paris (Masson éditeurs), 1954 (Prix : 750 francs).

Ce volume est le troisième d'une nouvelle Collection : **Evolution des Sciences,** dont le but est de permettre l'exposé de questions qui se situent un peu en dehors des sujets traditionnels faisant l'objet des grands Traités.

L'ouvrage de M. et Mme TERMIER nous montre les orientations nouvelles de la Géologie qui a bénéficié récemment des apports des disciplines voisines. Les auteurs ont choisi de traiter les étapes de la genèse des continents et de l'installation de la Vie sur le Globe.

L'un des progrès récents les plus manifestes a été la possibilité de mesurer les âges réels, en millions d'années, des minéraux radioactifs. L'échelle géologique est devenue plus précise et plus vivante. On peut y insérer avec soin l'évolution des orogènes (le terme de « cycle » est remplacé par celui de « drame ») et étudier les données du métamorphisme régional, la mise en place des granites, les grandes fractures.

La seconde partie du volume est consacrée à l'évolution de la Vie et des milieux, à l'apparition du manteau végétal et aux adaptations des ani-

maux, à la progression de la vie, enfin à la situation de l'Homme dans l'Histoire de la Terre.

C'est un petit livre bourré de faits, dont l'exposé et l'illustration sont excellents à tous égards. Son influence se fera sentir parce qu'il exprime clairement un certain nombre d'idées directrices qui font leur chemin depuis vingt ans, mais qui ne sont pas encore tout à fait classiques.

R. FURON.

WHITTAKER (Sir Edmund). — Le commencement et la fin du Monde (Traduit de l'anglais par Pierre HUMEBRT). — Un vol. in-16, 192 pages. Paris (Albin Michel), 1954 (Prix : 275 francs).

L'auteur, éminent mathématicien, s'est tourné vers les études philosophiques depuis quelques années et a donné une série de conférences qui ont eu un grand succès en Angleterre. Trois d'entre elles ont été groupées sous le titre du volume ; une quatrième termine le livre.

Nous ne suivrons pas l'auteur dans ses conceptions métaphysiques, nous nous bornerons à indiquer au passage quelques faits significatifs du point de vue de la philosophie scientifique.

L'évolution de la notion d'atome débute avec Démocrite. L'atome d'abord considéré comme particule indivisible, fut divisé en électrons en 1897. L'électron lui-même commença à perdre sa nature de corpuscule en 1927 pour devenir à la fois un corpuscule et une onde. Les nouveaux corpuscules élémentaires envisagés par la Physique mathématique n'ont ni existence permanente, ni localisation et ne peuvent être représentés que par des formules mathématiques. Le mécanisme est remplacé par une conception panmathématique de l'univers.

Utilisant les données de la radioactivité, l'auteur situe l'âge de la Terre entre 2,5 et 5,3 milliards d'années, ce qui se conforme aux données de la géologie. L'âge du Soleil serait de l'ordre de 8 milliards d'années ; celui de l'Univers reste inconnu.

Tout cela exprime les progrès considérables réalisés par la science moderne. Au XIX^{e} siècle, on essayait de tout reproduire en modèles réduits parce que l'on croyait avoir compris. Le chercheur du XX^{e} siècle est beaucoup plus modeste et cela dans toutes les disciplines où il a fallu réviser les notions classiques.

R. FURON.

Mme A. VANY. — Fondements théoriques de la Photographie. — Préface de M. E. Darmois, Editions de la Revue d'Optique, Paris, 1953, 146 pages, 52 figures.

La théorie des processus photographiques se trouve exposée dans divers ouvrages étrangers et il n'existait aucune publication française où les utilisateurs de la photographie puissent en trouver réunis les fondements théoriques. C'est dire si le livre de Mme Vany, rédigé à la suite d'un cours libre qu'elle a professé à la Sorbonne en 1951, vient à son heure.

Après un bref historique qui constitue le premier chapitre de l'ouvrage, les deux suivants traitent de l'action de la lumière sur les cristaux d'halogénures et sur les émulsions non chromatisées. L'étude de la sensiblisation vient ensuite. Les propriétés photographiques des rayons X et γ et l'action photographique des corpuscules chargés font l'objet des chapitres V et VI. L'étude du développement constitue le dernier chapitre de cet excellent ouvrage.

M. PARODI.

TABLE ANALYTIQUE DES MATIÈRES

contenues dans le tome LXI de la R. G. S.

I. - CHRONIQUE ET CORRESPONDANCE

BOULIGAND (Georges). — Prestige scientifique 131
BOULIGAND (Georges). — Confluences scientifiques 257
DELABY (Raymond). — Pierre Jolibois (1884-1954) 129
FURON (Raymond). — Les eaux de condensation en zone aride 1
FURON (Raymond). — L'industrialisation de l'Afrique 65
FURON (Raymond). — Evolution régressive dirigée 133
FURON (Raymond). — La vulgarisation scientifique 195
FURON (Raymond). — L'exploitation éventuelle et le peuplement du Sahara 321
HUISMAN (Denis). — Edouard Le Roy (1870-1954) 323
THÉODORIDÈS (J.). — L'Histoire des Sciences biologiques au XIV[e] Congrès International d'Histoire de la Médecine 261
TRICARD (Jean). — A propos de la catastrophe de Menton 193

II. - ARTICLES ORIGINAUX

Mathématiques

BOULIGAND (Georges). — Théories et jeux. Aspects et tendances 68
CHATELET (A.). — Les chemins par lesquels avancent les Sciences .. 272
DUBREIL-JACOTIN (Mme M. L.). — Quelques remarques sur le problème de la balançoire 264
ITARD (Jean). — Sur l'histoire des Fonctions Continues 5

Sciences Physiques

AMIEL (J.). — Les représentations symboliques de la structure de la matière au cours de l'évolution des théories chimiques 278
CECCALDI (P. F.). — La centrifugation artificielle en histochimie analytique 341
CURIEN (H.). — Quelques aspects cristallographiques de la physique moderne 88
JACQUESSON (Raymond). — Utilisation de diverses techniques scientifiques dans l'étude physique de la déformation plastique des métaux. 324
MOREAU (Robert C.). — Les Radioprotecteurs chimiques 197
ROUARD (P.). — Applications scientifiques et techniques des lames minces solides 136
VARCOLLIER (A.). — Théorie ellipsoïdale et relativité 86

Sciences Biologiques

DALCQ (A. M.). — Nouvelles données structurales et cytochimiques sur l'œuf des Mammifères 19
DECHAMBRE (E.). — Evolution du mécanisme de l'Hérédité 148
DELSOL (Michel). — Un mécanisme évolutif riche en suggestions : la Néotémie chez les Batraciens 221
PARROT (Aimé G.). — La Tricotylie en tératologie végétale 94
PASTEUR-VALLERY-RADOT. — La Médecine en Amérique latine 170
SAENZ (A.). — Développement de la vaccination antituberculeuse par le B. C. G. dans les pays de l'Amérique latine 231
VACHON (Max). — Répartition actuelle et ancienne des Onychophores ou Péripates 300

Géologie et Géographie

FURON (Raymond). — Biogéographie et paléogéographie 158
HOFFSTETTER (Robert). — Les Mammifères fossiles de l'Amérique du sud et la Biogéographie 347
TRICART (Jean). — L'aménagement agricole des régions sèches de l' U. R. S. S. 42

Histoire des Sciences

AMIEL (J.). — Les représentations symboliques de la structure de la matière au cours de l'évolution des théories chimiques 278
ITARD (Jean). — Sur l'histoire des fonctions continues 5
SERGESCU (P.). — Savants français en Hollande 309

Autres activités scientifiques

DUBREIL (P.). — M. Pierre CHATELET, président de l'A. F. A. S. 184
HUISMAN (Denis). — Pour une esthétique de laboratoire 110

III. - BIBLIOGRAPHIE
Table analytique des auteurs

Note de la Rédaction. — Désireux de réduire au minimum la place occupée par nos tables, nous nous sommes contentés d'indiquer ci-dessous les noms des auteurs dont les ouvrages ont été analysés dans le tome LXI.

A - B

ABELE (Jean) et MALVAUX (Pierre) 250
AUBERT de la RUE (E.), NOULIÈRE (F.) et HAROY (J. P.) 378
BARCHEWITZ (P.) ; AMAT (G.) et ROSETTI (C.) 186
BAYER (Raymond) 257
BELLMANN (R.). 54
BERGE (Cl.) 74
BIDARD (René) 54
BINET (Jean) 186
BOURLIÈRE (Dr François) .. 314
BURGESS (E.) ..... 251 ; 314
BIDAULT DE L'ISLES (G.) 378
BOREL (E.), DELTHEIL (R.) et HURSON (R.) 379
BOULIGAND (Georges) 379

C

CANALS (Frau Salvador) 55
CARLIN (B.) 55
CAVE (R.) 257
CHAMPETIER (G.) 56

CHILDE (V. Gordon) 56
CORSON (E. M.) 57
COUDERC (Paul), PECKER (J. C.) et SCHATZMAN (F.). 258
CUVILLIER (A.) 251

D

DARMOIS (E.) 57
DELAY (Jean) 58
DELHAYE (Jean) 259
DENJOY (Arnaud) 78, 315
DENIS-PAPIN (M.), VALLOT (J.) et FOUILLE (A.) 59
DERIBERE (M.) 380
DESJOBERT (A.) 251
DIOLE (Ph.) 59
DUFAY (Jean) 260
DUHEM (Pierre) 186

E - F

EINSTEIN (A.) 315
EVANS (R. C.) 315
FORTET (Robert) et BLANC-LAPIERRE 84
FOUILLE (A.) 316
FRIEDRICHS (K. O.) 252
FYOT (J. L.) 253
GAMOV (G.) 317
GARNIER (René) 60
GAYDON (A. G.) 60
GAYDON (A. G.) et WOLF-HARD (H. G.). 253
GERING (R. L.) 254
GOUYON (R.) 187
GRÉGOIRE (F.) 61
GUILLIEN (R.) 317

H - I - J - K

HUGUES (D. J.) 187
JAEGER (C.) 188
JAOUL (Bernard) 318
KRAITCHIK (Maurice) 72

L

LABORIT (H.) 318
LAMBERT (A.), DUBOIS (Mme P.) et STOYKO (N.) 188
LANSREAUX (Guy) 188
LAPADU-HARGUES (P.) 189
LE CORBEILLER (Ph.) 319
LECORGUILLIER (J.) 319
LÉVY (Paul) 320

M

MANDELBROT (Benoît) 74
MENGER (Karl) 77
MILLOUX (Henri) et PIROT (Ch.) 61
MONJALLON (A.) 258
MORSE (Ph. M.) et FESCH-BACH (H.) 126

N - O - P

NEUMANN (J. von) et MORGENSTERN (O.) 74
NORTHROP (E. P.) 70
PASCAL (P.) 62
PASCHKIS (V.) 62
PELEGRIN (M. J.) 189
PITZER (K. S.) 127

R - S

RAVIGNEAUX (P.) 189
ROCARD (Y.) 190
ROUCH (J.) 380
RUSSO (F.) 127
SEDILLE (M.) 128
SEGUY (E.) 190
SEILIGER (M) 191
SOYER Robert 62

T - U - V - W

TATON (René) 73
THALLER (G.) 128
TERMIER (H. et G.) 380
TRJITZINSKY (W. J.) 77
VALIRON (Georges) 191
VANY (Mme A.) 381
VERRILL (A. Hyatt) 255
VIARD (Dr Marcel) 256
VOGEL (Th.) 256
WHITTAKER (Sir Edmund) .. 381
WEYL (A. R.) 128
WHITE (Marsh W.) et MANNING (Kanneth V.) 320

X

Accélérateurs de particules (Les 63
Centre Belge de Recherches Mathématiques 320
Léonard de Vinci et l'expérience scientifique 70
Travaux de la Commission d'étude des fondations de pylones 192

Imprimerie Jacques et Demontrond, Besançon. — 4820 - 2-55
Dépôt légal 1er trimestre 1955 : n° 5588. Le Gérant : R. CONSTANS.